

要因分析表 (タービンブレードの疲労破壊)

確認事項	故障モード	要因	懸念事項	点検内容	点検結果	判定	備考
R 側過給機のタービンブレードに折損を確認 R 側過給機のレーシングワイヤに異常的な応力による破断を確認	タービンブレードの疲労破壊	【要因 1】 化学成分	・材料が設計仕様逸脱による強度不足により、き裂発生の原因となる。	・ R 側過給機の No. 3 3 タービンブレード及び L 側過給機の No. 2 3・2 4 間ファッリー部の断面を E P M A にて分析、確認する。 Electron Probe Micro Analyzer: 電子線を照射し、発生する特性 X 線の波長と強度から構成元素を分析する手法	・ E P M A 分析によりタービンブレードファッリー部とロータファッリー部は、いずれも設計仕様材料と同一の化学成分であり、異常は確認されなかった。	×	添付資料 - 9 ( 1 )
		【要因 2】 硬度分布	・硬度が設計仕様逸脱による強度不足により、き裂発生の原因となる。	・ R 側過給機の No. 3 3 タービンブレードファッリー部及び L 側過給機 No. 2 3・2 4 間ロータファッリー部の断面の硬度を測定する。	・ 硬度はタービンブレードファッリー部、ロータファッリー部のいずれも硬さは均一な分布であり、異常は確認されなかった。	×	添付資料 - 9 ( 2 )
		【要因 3】 引張強度	・引張強度が設計仕様逸脱による強度不足により、き裂発生の原因となる。	・ R 側過給機の No. 3 4、3 5、3 6 タービンブレードファッリー部及び L 側過給機の No. 2 6・2 7 間ロータファッリー部より試験片を取出し、引張試験を行う。	・ 引張強度はタービンブレードファッリー部、ロータファッリー部のいずれも設計仕様を満足しており、異常は確認されなかった。	×	添付資料 - 9 ( 3 )
		【要因 4】 初期欠陥	・材料の初期欠陥により、き裂発生の原因となる。	・ R 側過給機のタービンブレードファッリー部、L 側過給機のタービンブレードファッリー部及び L 側過給機ロータファッリー部で確認されたき裂箇所について SEM 観察を実施する。	・ SEM 観察を実施し、介在物と 10 μm 程度のピットが確認されたが、200 μm の欠陥が存在しても疲労限度内であり、10 μm 程度の内部欠陥は十分許容できる強度を有していることを確認した。このことから初期欠陥となり得る内部欠陥は確認されなかった。	×	添付資料 - 9 ( 4 )
設計条件に関する要因	【要因 5】 材料選定	・必要強度に対する材料の選定間違いにより、き裂発生の原因となる。	・タービンブレード及びロータシャフトの材料の使用実績を確認する。	・ 大型船舶やディーゼル発電機の過給機タービンブレード等の材料に標準材料として採用されており、これまでの使用実績において問題がないことを聞き取りにて確認した。	×	添付資料 - 9 ( 5 )	
	【要因 6】 遠心応力	・正常運転において、過大な遠心応力が発生し、き裂発生の原因となる。	・レーシングワイヤ付加重重の応力解析を実施する。 ・修正グッドマン線図を用いた評価を実施し、応力解析結果が設計値 (疲労限度) を上回らないことを確認する。	・ 応力解析結果により疲労限度内にあることを確認した。	×	添付資料 - 9 ( 6 )	
	【要因 7】 レーシングワイヤ局部応力	・正常運転において、付加重重が発生し、き裂発生の原因となる。	・レーシングワイヤの遠心応力による付加重重のタービンブレードへの作用角度 (5°、10°、15°) の 3 ケースについて応力解析を実施する。 ・修正グッドマン線図を用いた評価を実施し、応力解析結果が設計値 (疲労限度) を上回らないことを確認する。	・ 付加重重作用角度 (5°、10°、15°) について応力解析により疲労限度内にあることを確認した。	×	添付資料 - 9 ( 7 )	
	【要因 8】 起動・停止過程における過大な応力	・起動・停止過程において、過大な応力が発生し、き裂発生の原因となる。	・タービンブレード及びタービンロータアクセスリモデルによる固有値解析及びハンマリング試験による固有値計測により確認する。	・タービンブレード及びタービンロータアクセスリモデルによる固有値解析を実施し、解析結果から想定される回転数領域に、共振点は存在しないことが確認された。	×	添付資料 - 9 ( 8 )	
加工不良に関する要因	【要因 9】 ファッリー形状	・ファッリー形状の寸法、クリアランス異常により、ファッリー部くびれ部の応力が過大となり、き裂発生の原因となる。	・ファッリー形状製作に関する製作時品質記録、要領書、管理基準に関する調査を実施する。	・製作当時のファッリー部加工結果を示す品質記録は存在していないものの、出荷条件となる判定基準 (ファッリー部を組み立てることができること) を満足していることから、品質管理上、問題はなかったと考える。	×	添付資料 - 9 ( 9 )	
	【要因 10】 ファッリー部加工方法	・加工方法の変更により面粗度が粗くなり、疲労限度が低下し、き裂発生の原因となる。	・ファッリー部加工方法の変更における面粗度の設計値を調査し、変更がないことを確認する。 ・面粗度を計測する。	・加工設備の変更に係らず面粗度の設計値は変わっていないことを確認した。また、き裂が発生した R 側過給機 (No. 1 タービンブレードファッリー部) の面粗度を計測した結果、設計値を満足していることを確認した。	×	添付資料 - 9 ( 10 )	
	【要因 11】 レーシングワイヤ線径	・レーシングワイヤの線径の設計値逸脱に伴い、ファッリー部くびれ部に作用する応力が過大となり、き裂発生の原因となる。	・レーシングワイヤの線径計測を行い、必要強度を有していることを確認する。	・レーシングワイヤの線径が応力解析の結果に対して必要強度を十分有していることを確認した。	×	添付資料 - 9 ( 11 )	
	【要因 12】 レーシングワイヤ孔径及び孔高さ	・レーシングワイヤ孔径及び孔高さが部分的に設計値を逸脱し、隣接するタービンブレード間を貫通しているレーシングワイヤが傾くことで、ファッリー部くびれ部の応力を高め、き裂発生の原因となる。	・タービンブレードのレーシングワイヤ孔径及び孔高さを計測し、設計値内であることを確認する。 ・加工方法の妥当性について検証する。	・レーシングワイヤ孔径に、設計値を僅かに超えるものが確認された。また、レーシングワイヤ孔高さについて設計値を逸脱し隣接するタービンブレードとの低差が大きい箇所があることを確認した。 メカに置き取りした結果、レーシングワイヤ孔の設計値逸脱は、製造時に全数検査を行っていることから運転中の摩耗が原因であると考えられ、一方レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱の原因は、製作時の加工不良である可能性が高いことを確認した。	×	添付資料 - 9 ( 12 )	
組立不良に関する要因	【要因 13】 レーシングワイヤ取付	・レーシングワイヤ止端部形状や取付状態に不良があると、き裂発生の原因となる。	・レーシングワイヤ止端部形状や取付状態の至近の本格点検記録にて、止端部形状や取付状態の異常なしを確認する。	・至近の本格点検時の点検結果において異常がないことを確認した。	×	添付資料 - 9 ( 13 )	
	【要因 14】 ブレード取外・取付作業	・ファッリー形状の変形や接触面の当たり状態が変化すると、き裂発生の原因となる。	・過去の点検記録を確認する。 ・外観目視にて確認する。	・タービンブレード取外・取付作業は、当発電所 2 号機において発生した非常用ディーゼル発電機過給機の不具合に伴う水平吊りとして、当該 D / G 過給機のレーシングワイヤ孔の再加工工事の際に実施されていた。 取外し後の再取付実施前には、ファッリー部に付着した煤や腐食生成物の洗浄を実施することから、再取付によってファッリー部間の当たり状態が変わり、タービンブレードき裂発生の原因の可能性があると考える。 また、打撃により発生したロータファッリー部端部の変形がファッリー部間の当たり状態を変化させ、タービンブレードファッリー部への応力増加となった可能性があると考える。	×	添付資料 - 9 ( 14 )	
外的要因に関する要因	【要因 15】 腐食・汚れ	・腐食・汚れによる経年変化による応力が発生し、き裂発生の原因となる。	・外観目視にて腐食、汚れの状況を確認する。	・ R 側過給機の損傷ブレードのファッリー部に酸化スケール及び煤と思われる汚れを確認した。 ・ファッリー部間のクリアランスへ汚れが入り込むことによりファッリー部間の当たり状態が変化し、ファッリー部に歪みによる局部応力が発生した可能性がある。	×	添付資料 - 9 ( 15 )	
	【要因 16】 運転負荷	・運転負荷上昇率が過去の運転変遷において変化点があり、それを起因として過大な応力が発生し、き裂発生の原因となる。	・過去の非常用ディーゼル発電機出力上昇曲線を確認する。	・納入からの現時点に至るまで発電機並列 - 定格負荷 - 発電機解列までの運用方法について変更がないことを確認した。	×	添付資料 - 9 ( 16 )	
	【要因 17】 運転時間、起動回数	・運転時間、起動回数が当該 D / G のみ過度に多く、経年影響により、き裂発生の原因となる。	・プラントの運転開始からの総運転時間、起動回数を確認する。	・総運転時間、起動回数について、他の非常用ディーゼル発電機と比較して特異性は無い。	×	添付資料 - 9 ( 17 )	
	【要因 18】 保守・整備	・ロータシャフト取外・取付時にブレードを接触させ、き裂発生の原因となる。	・前回の本格点検記録を確認する。	・前回の過給機本格点検記録 (第 14 回、2005 年) を調査したが、ブレードを接触させたという記録は無かった。	×	添付資料 - 9 ( 18 )	
	【要因 19】 経時的変化	・タービンブレードファッリー部及びロータファッリー部の寸法が経時的に変化し、応力が増大することで、き裂発生の原因となる。	・三次元計測にてファッリー部寸法を確認する。 (ブレード、ロータシャフトの 10% を三次元計測し確認する) ・タービンブレードファッリー部の応力解析 ・ロータファッリー部の応力解析	・タービンブレードファッリー部の寸法が設計仕様を逸脱していることを確認した。 ・ロータファッリー部の寸法が設計仕様を逸脱していることを確認した。 ・応力解析の結果、タービンブレードファッリー部は、当該 D / G 定格運転中は 0.2% 耐力を加味した弾性限度を逸脱することから、経時的な寸法変化が生じる。一方、ロータファッリー部については、弾性限度を逸脱することはないため、経時的な寸法変化が生じることはない。	×	添付資料 - 9 ( 19 )	

: 要因の可能性あり、x: 要因の可能性はないと考えられる

## タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

### 【要因 1】 化学成分

タービンプレード及びタービンロータシャフトの材料が設計要求仕様を逸脱していると、強度不足により、き裂発生の起因となる可能性がある。

#### （ 1 ） 調査内容及び判定基準

- ・タービンプレードファツリー部及びロータファツリー部の断面をE PMA<sup>※1</sup>にて分析を実施し、材料の化学成分を確認すること
- ・健全箇所（健全箇所）のタービンプレードファツリー部とロータファツリー部の化学成分を確認し、設計要求材質とおりの化学成分であること

<試験片として使用した健全箇所>

R側過給機のNo. 33タービンプレードファツリー部

L側過給機のNo. 23-24間ロータファツリー部

※1 E l e c t r o n P r o b e M i c r o A n a l y z e r : 電子線を照射し、発生する特性X線の波長と強度から構成元素を分析する手法

#### （ 2 ） 点検結果

- ・成分分析結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	タービンプレードファツリー部	異常なし	2018/12/13	表-1
2	ロータファツリー部	異常なし	2019/1/17	表-2

表-1 タービンブレードファツリ一部成分分析結果 (w t %)

	C	S i	M n	N i	C r	C o	T i
規定値	[Redacted]						
分析結果	-	0.1	-	57.7	20.5	16.7	2.2
	A l	F e					
規定値	[Redacted]						
分析結果	1.5	1.3					

表-2 ロータファツリ一部成分分析結果 (w t %)

	C	S i	M n	P	S	C r	M o
規定値	[Redacted]						
分析結果	-	0.5	1.0	-	-	11.4	1.3
	V	C u	N	N b	B	F e	
規定値	[Redacted]						
分析結果	0.4	-	-	-	-	85.5	

## タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

## 【要因2】 硬度分布

タービンプレード及びロータシャフトの硬度が設計要求仕様を逸脱していると、強度不足となり、き裂発生の原因となる可能性がある。

## (1) 調査内容及び判定基準

- ・タービンプレードファツリー部及びロータファツリー部の断面の硬さ測定を実施し、健全箇所（図-1）のタービンプレードファツリー部とロータファツリー部の硬度分布が均一であること

<試験片として使用した健全箇所>

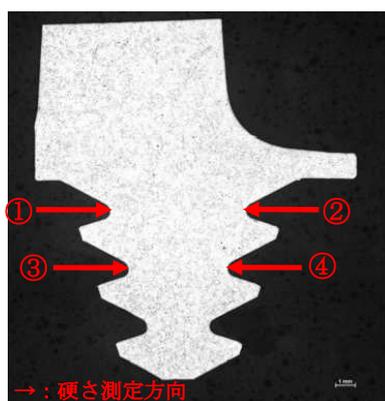
R側過給機のNo. 33タービンプレードファツリー部

L側過給機のNo. 23-24間ロータファツリー部

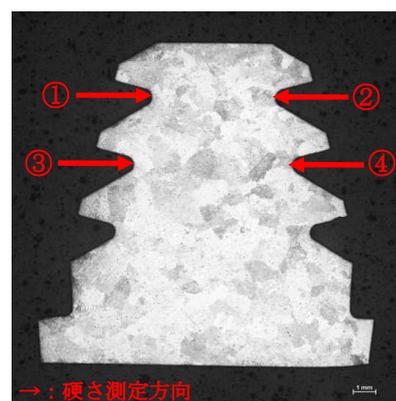
## (2) 点検結果

- ・硬度分布計測結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	タービンプレードファツリー部	異常なし	2018/12/13	図-1
2	ロータシャフトファツリー部	異常なし	2019/1/17	図-2



タービンプレードファツリー部測定点



ロータシャフトファツリー部測定点

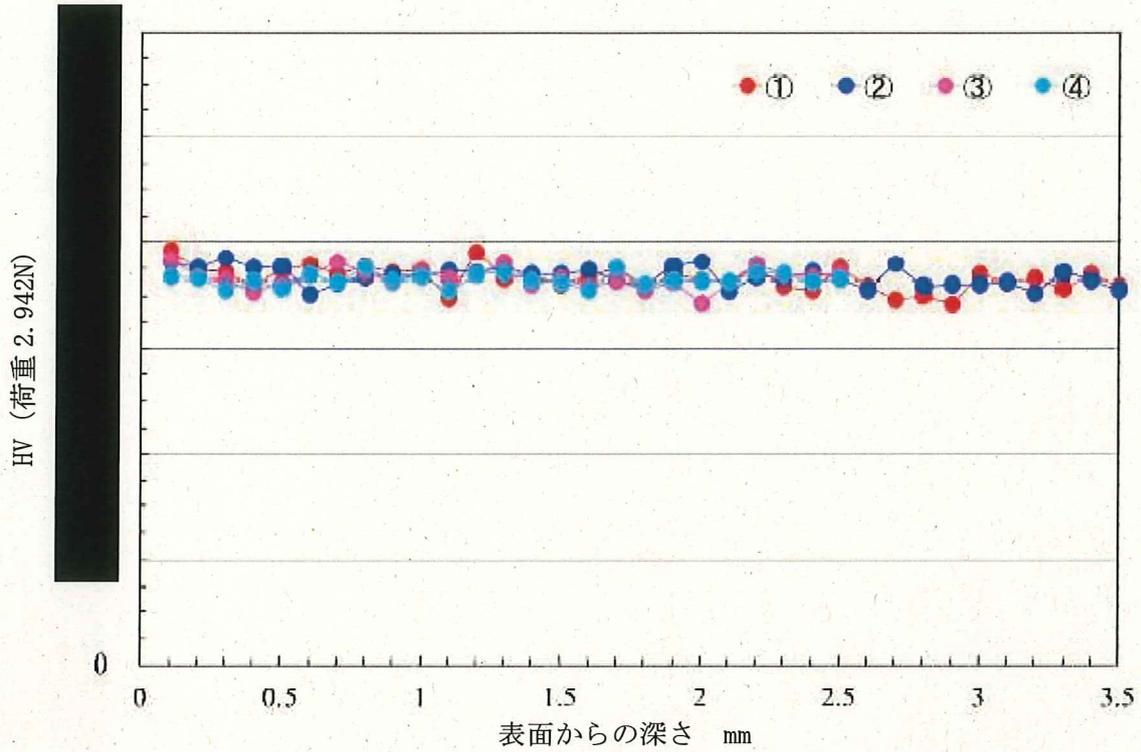


図-1 タービンブレードファツリ部硬度分布計測結果

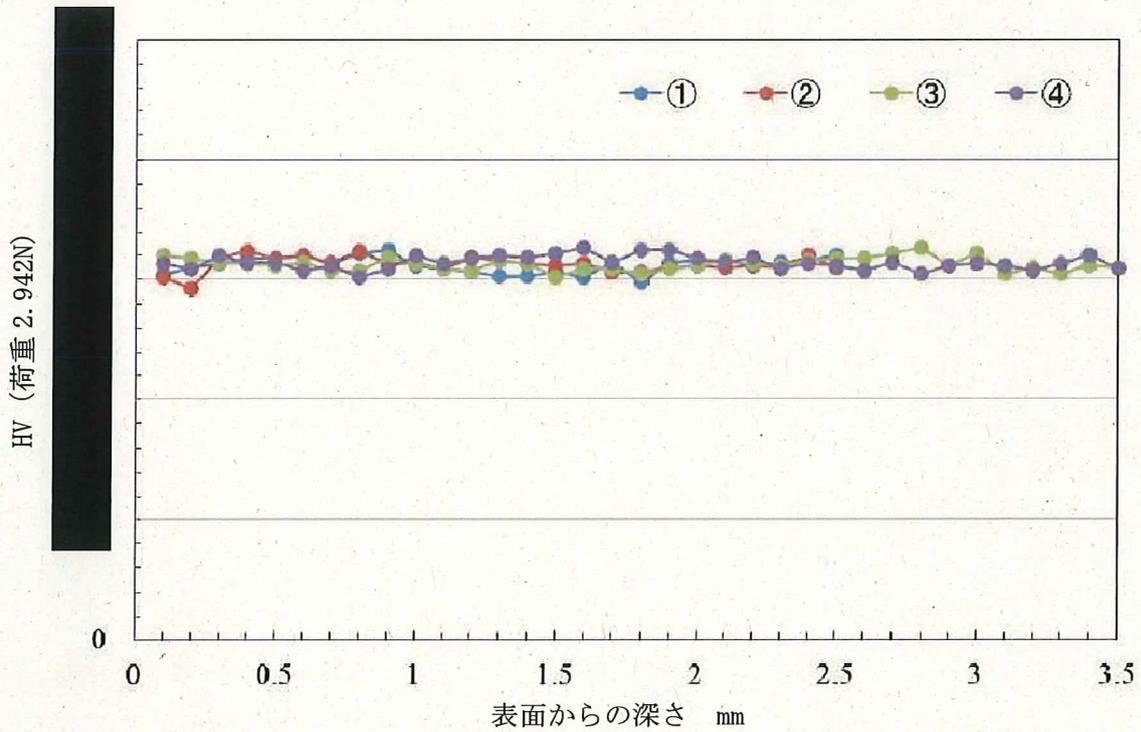


図-2 ロータファツリ部硬度分布計測結果

タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因 3】 引張強度

タービンプレード及びロータシャフトの引張強度が設計要求仕様を逸脱していると、強度不足となり、き裂発生の起因となる可能性がある。

(1) 調査内容及び判定基準

- ・健全箇所タービンプレードファツリー部及びロータファツリー部より試験片を取出し、引張試験を実施し、0.2%耐力及び引張強度が設計値以上であること

<試験片として使用した健全箇所>

R側過給機のNo. 34、35、36タービンプレードファツリー部

L側過給機のNo. 26-27間ロータファツリー部

(2) 点検結果

- ・引張試験結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	タービンプレードファツリー部	異常なし	2019/1/25	表-3
2	ロータファツリー部	異常なし※2	2019/1/25	表-4

※2 L側過給機のNo. 26-27間ロータファツリー部の引張試験において、伸びはわずかに設計値を下回る結果が得られたが、0.2%耐力及び引張強さについては、設計値を満足しており大幅な材料強度の低下は認められない。



## タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

## 【要因 4】 初期欠陥

タービンプレード及びロータシャフトの材料に初期欠陥が存在していると、き裂発生  
の起因となる可能性がある。

## (1) 調査内容及び判定基準

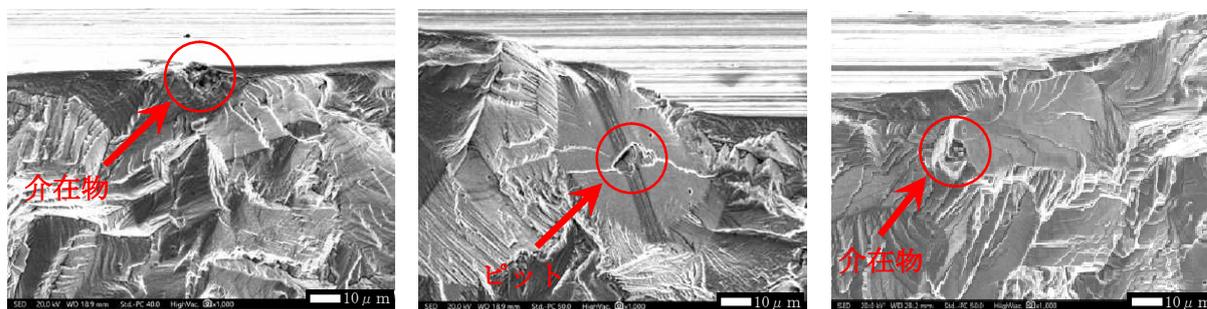
- ・ R側過給機のタービンプレードファツリー部、L側過給機のタービンプレードファツリー部及びL側過給機ロータファツリー部で確認されたき裂箇所破面のSEM観察を実施する。
- ・ き裂箇所破面のSEM観察を実施し、初期欠陥となり得る内部欠陥がないこと

## (2) 点検結果

- ・ 破面SEM観察結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	き裂箇所	異常なし※ <sup>3</sup>	2018/12/21	図－ 3、 4

※<sup>3</sup> き裂箇所破面のSEM観察を実施し、介在物と10 $\mu$ m程度のピットが確認されたが、内部欠陥、介在物等が存在する場合の疲労強度の低下を推察したが、200 $\mu$ mの欠陥が存在しても「図－ 5 高サイクル疲労評価の修正グッドマン線図」に示すとおり、タービンプレードに発生する平均応力、応力振幅は「表－ 5 欠陥の大きさ別の疲労強度低減率」に示すとおり変わらず疲労限度内であり、10 $\mu$ m程度の内部欠陥は十分許容できる強度を有していると考ええる。このことから初期欠陥となり得る内部欠陥は確認されなかった。



R側過給機

L側過給機

図－ 3 R側及びL側過給機のき裂箇所及びファツリー部SEM観察結果

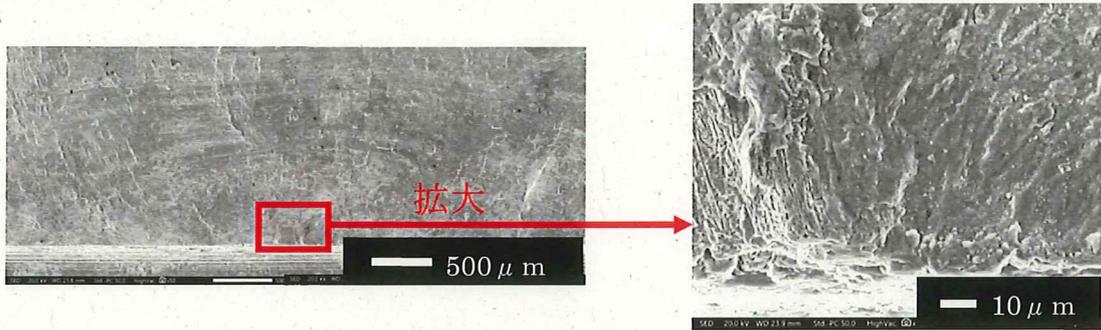


図-4 L側過給機のき裂箇所及びロータファツリー部SEM観察結果

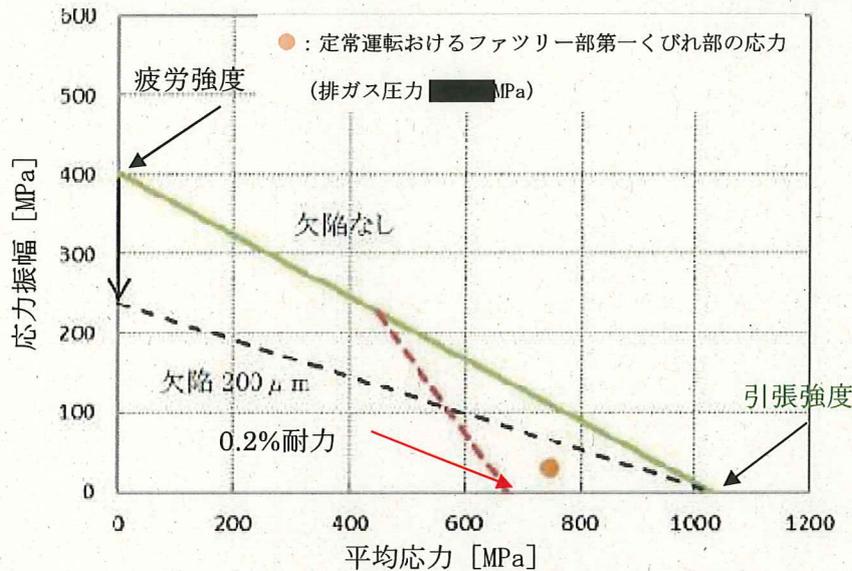


図-5 高サイクル疲労評価の修正グッドマン線図

表-5 欠陥の大きさ別の疲労強度低減率

	欠陥直径 (μm)	$\sqrt{\text{area}}$ (μm)	疲労強度 $\sigma_w$ (MPa)	対比 (%)
欠陥なし	—			100
Case 1	10			97
Case 2	50			74
Case 3	100			66
Case 4	200			59

$$\sigma_w = \frac{1.56 \times (HV+120)}{(\sqrt{\text{Area}_{\max}})^{1/6}} \dots \text{内部の微小欠陥、き裂、介在物に対する疲労限度評価式}$$

$\sigma_w$ : 修正疲労限度、HV: ビッカース硬さ、 $\sqrt{\text{Area}_{\max}}$ : 欠陥の大きさ

(出典: 「微小欠陥と介在物の影響」村上敬宜 著)

※上記の式は、内部起点の疲労破壊が問題となる高強度鋼に適用される場合が多いが、その考え方自体は、同じ村上らによる表面欠陥を対象とした式(文献参照)に基づく。当該文献では、式中の定数が材料に依存しないことが明示されており、この考え方をタービンブレードの材料に適用することも可能であると考えられる。

- ・ 疲労限度評価式のビッカース硬さについては、タービンブレードの調査で実施したR側 No. 33 の硬さ分布計測データより、ビッカース硬さ HV340 (常温での硬さ) を使用
- ・ 硬さと引張強さには相関性があり、実運用時は温度が上昇することから、常温と高温で、引張強さと硬さが比例するものとし、常温 (20℃) の引張強さ 1175MPa、高温 (600℃) の引張強さ 1027MPa より、 $1027 / 1175 = 0.87$  を硬さの温度補正係数とした。
- ・ HV340 に対するばらつきを考慮し、その補正值を保守的に 0.8 とした。
- ・ 疲労限度評価式に代入するビッカース硬さとして、 $340 \times 0.87 \times 0.8 \rightarrow$  約 240 を使用

10  $\mu$  m 程度の欠陥が、損傷の要因にならないことを示すため、保守的に 200  $\mu$  m の欠陥があったとして評価を実施した。

## タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

## 【要因 5】材料選定

必要強度に対する材料の選定間違いがあると、き裂発生の原因となる可能性がある。

## (1) 調査内容及び判定基準

- ・タービンプレード及びロータシャフト材料に対する使用状況の、メーカへの聞き取りを実施し、材料選定に問題がないか確認すること

## (2) 点検結果

- ・使用実績調査結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	タービンプレード及び ロータシャフト	使用実績あり※4	2019/1/17	—

※4 大型船舶やディーゼル発電機の過給機タービンプレード等の材料に標準材料として採用し、これまでの使用実績においても問題ないことを聞き取りにて確認した。

## タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

## 【要因 6】遠心応力

設計条件で求めた遠心応力に対して実際の構成部材に作用する遠心応力が過大であると、き裂発生の起因となる可能性がある。

## (1) 調査内容及び判定基準

- ・レーシングワイヤ付加荷重の応力解析を実施する。
- ・レーシングワイヤ付加荷重の応力解析結果を評価し、設計値（疲労限度）を上回らないこと

## (2) 点検結果

- ・応力解析結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	レーシングワイヤ	異常なし※ <sup>5</sup>	2018/11/30	別紙-1

※<sup>5</sup> レーシングワイヤ付加荷重を考慮した解析を実施し修正グッドマン線図を用いた評価を行ったところ疲労限度内にあることを確認した。

## タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

## 【要因 7】レーシングワイヤ局部応力

タービンプレードに対するレーシングワイヤの遠心応力が設計条件と異なると、タービンプレードへの付加荷重が発生し、き裂発生の原因となる可能性がある。

## (1) 調査内容及び判定基準

- ・レーシングワイヤの遠心応力による付加荷重のタービンプレードへの作用角度 3 ケース（ $5^{\circ}$ 、 $10^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$ ）の応力解析を実施し、設計値（疲労限度）を上回らないこと

## (2) 点検結果

- ・応力解析結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	レーシングワイヤ	異常なし <sup>※6</sup>	2018/11/30	別紙－1

※6 レーシングワイヤの遠心応力による付加荷重について、タービンプレードへの作用角度を $5^{\circ}$ 、 $10^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$ とした場合に修正グッドマン線図を用いて評価したところ、レーシングワイヤ作動角度が付いた場合にファツリー部への応力振幅がわずかに疲労限度に近づくものの疲労限度内にあることを確認した。

## タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

## 【要因 8】 起動・停止過程における過大応力

起動・停止過程において、発電機出力が中間出力時の低回転域や定格出力到達時に発生するオーバーシュートによる過給機の過回転により設計条件を上回る過大な応力が発生すると、き裂発生の起因となる可能性がある。

## (1) 調査内容及び判定基準

- ・タービンプレード及びタービンロータアッセンブリモデルによる固有値解析及びハンマリング試験を実施し、固有振動数計測を実施する。
- ・解析結果と計測結果を確認し、想定される回転数領域に共振点が存在しないことを確認すること

## (2) 点検結果

- ・応力解析結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	タービンプレード及びタービンロータアッセンブリ	異常なし※7	2018/12/19	別紙-2

※7タービンプレード及びタービンロータアッセンブリモデルによる固有値解析を実施し、想定される回転数領域に、共振点は存在しないことを確認した。

## タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

## 【要因 9】 ファツリー形状

ファツリー形状について、設計値と異なる寸法に製作すると、ファツリー部間のクリアランスが無くなることで、ファツリー部のくびれ部に作用する応力が過大となり、き裂発生の起因となる可能性がある。

## (1) 調査内容及び判定基準

- ・ファツリー形状製作に関する製作時品質記録、要領書、管理基準に関する調査を実施する。
- ・ファツリー形状製作に関する製作時品質記録、要領書、管理基準を調査し、寸法、クリアランスが定められていること

## (2) 点検結果

- ・ファツリー形状製作図書調査結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	ファツリー部	異常なし※ <sup>8</sup>	2019/2/19	—

※<sup>8</sup> ファツリー形状製作に関する製作時品質記録、要領書、管理基準に関する調査を実施した。製作当時のファツリー部加工結果を示す品質記録は存在していないものの、出荷条件となる判定基準（ファツリー部を組み立てることができること）を満足していることから、品質管理上、問題はなかったと考える。

タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因10】ファツリー部加工方法

ファツリー部の面粗度が粗くなると、疲労限度が低下し、き裂発生の原因となる可能性がある。

(1) 調査内容及び判定基準

- ・ファツリー部加工方法の変遷における面粗度の設計値を調査し、変更のないことを確認する。
- ・面粗度の設計値を調査し、設計値 (Ra           ) 以下であること

(2) 点検結果

- ・ファツリー部加工方法の変遷

	点検対象	結果	点検日	備考
1	ファツリー部	異常なし <sup>※9</sup>	2019/1/16	表-6

※9タービンプレード側は1985年まで縦型ブローチ盤によって加工されており、K-1製造時(1981~1982年)も同様であった。

ロータシャフト側は横型ブローチ盤により加工していたが、設備の老朽化により1977年から縦型ブローチ盤に変更した。K-1(1981~1982年)は後者の設備で加工していた。

加工方法の変更に係らず面粗度の設計値は変わっていないことを確認した。

タービンプレードファツリー部及びロータファツリー部の加工変遷を表-6に示す。

- ・面粗度

	点検対象	結果	点検日	備考
2	ファツリー部	異常なし <sup>※10</sup>	2019/1/16	図-6

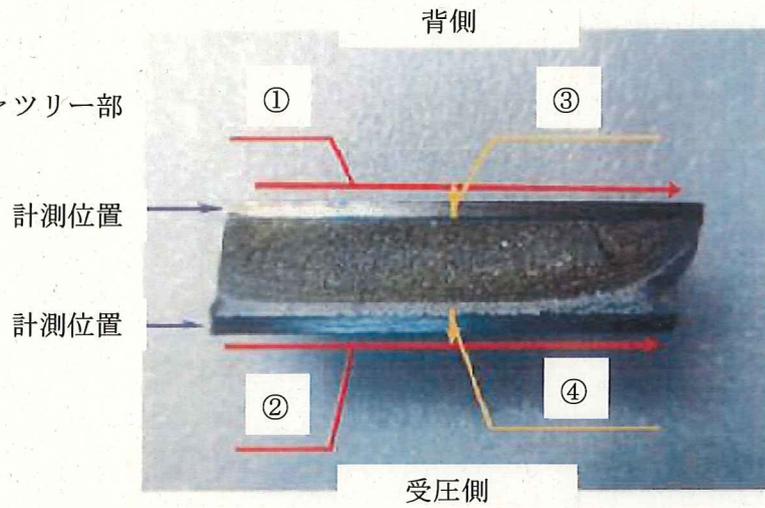
※10き裂が発生したR側過給機のNo. 1タービンプレードファツリー部面粗度の計測結果は、設計値を満足しておりファツリー部加工方法に関する問題は確認されなかった。

表-6 タービンブレードファツリ部及びロータファツリ部の加工方法の変遷

年代	ロータシャフト		タービンブレード			レーシングワイヤ 孔加工	備考 (各サイト)
	加工機	カッター	加工機	砥石	ダイヤモンド ドリル		
1970年 以前	同下 (推定)	同下 (推定)	同下 (推定)	同下 (推定)	同下 (推定)	汎用ボール盤 ( ) ドリル+リマ	工場 1F-1/2 ( ) 1969年
1970年	横型フーチ盤 ( )	( )	縦型フーチ盤 ( )	フーチカッター 切削加工	不要	同上	( ) 操業開始
1972年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	1F-2 ( ) 1F-3 ( ) 1F-3/4 ( )
1973年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	1F-5A ( )
1974年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	1F-4A, 5B ( )
1976年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	1F-6A, 6H ( )
1977年	縦型フーチ盤 ( )	( ) フーチカッター	同上	同上	同上	同上	/
1980年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	K-5H ( )
1981年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	K-1H ( )
1982年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	2F-3A, 3B, 3H, 4A, 4B, 4H ( ) K-1A, B ( )
1983年	同上	同上	同上	同上	同上	電解ボール盤	K-2A, B ( ) K-2H ( )
1985年	同上	同上	( )研 削盤	砥石 ( )	( )	同上	/
1986年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	K-5A, B ( )
1987年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	/
1990年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	K-3A, B ( ) K-3H ( )
1991年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	K-4A, B ( ) K-4H ( )
1992年	同上	同上	同上	同上	同上	ラジアルボール盤 ドリル+リマ	K-6A ( )
1993年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	K-6B, C ( ) K-7A ( )
1994年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	( )工場へ製 造移管 1F-6B ( ) K-7B, C ( )
1995年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	1F-2B, 4B ( )
2015年	同上	同上	( )研削盤	砥石 ( )	同上	同上	/
現在	同上	同上	同上	同上	同上	同上	/

加工方法の変更が行われても面粗度の設計値はR a ( )で変更がないことを確認。

(計測対象)  
R側過給機の  
No.1 タービンブレードファツリー部



・ファツリー形状加工平行方向

計測位置	背側①	受圧側②
計測値	R a 0.291~0.650	R a 0.376~0.604
結果	良	良

・ファツリー形状加工直角方向

計測位置	背側③	受圧側④
計測値	R a 0.382	R a 0.426
結果	良	良

判定基準

面粗度が設計値 (R a           ) 以下を満足していること。

図-6 面粗度計測記録

タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因11】レーシングワイヤ線径

レーシングワイヤの線径が設計値を逸脱すると、ファツリー部くびれ部に作用する応力が過大となり、き裂発生の起因となる可能性がある。

(1) 調査内容及び判定基準

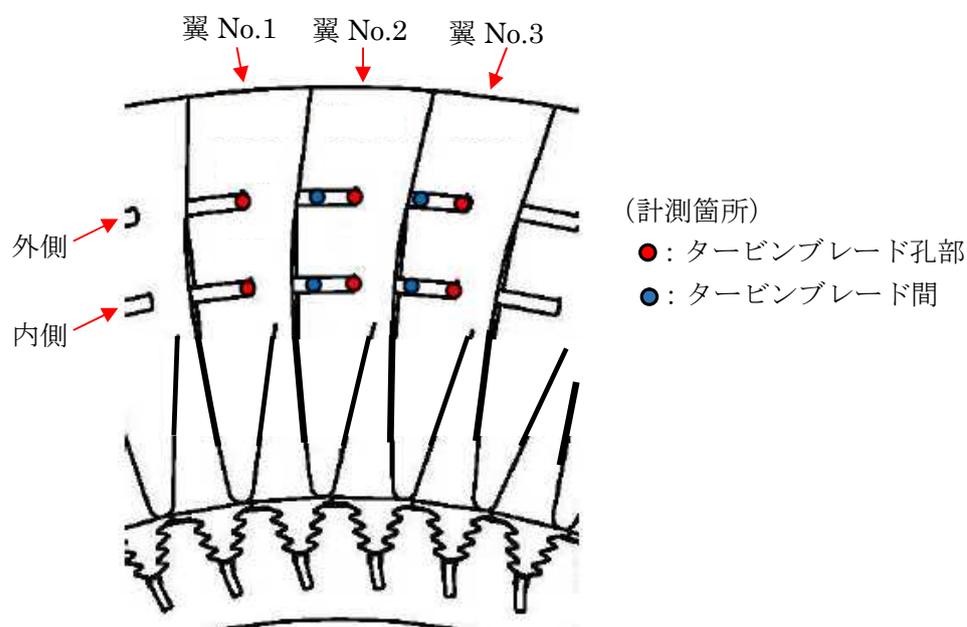
- ・レーシングワイヤ線径の計測を実施し、必要強度を有していること

(2) 点検結果

- ・線径計測結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	レーシングワイヤ	異常なし※11	2018/11/15	表-7、8

※11 実測されたレーシングワイヤ線径が応力解析の結果に対して必要強度を十分有していることを確認している。



レーシングワイヤ線径 計測箇所詳細図

表-7 レーシングワイヤ (R側) 線径計測結果

R側線径								
翼No.	内	外	翼No.	内	外	翼No.	内	外
1	-	-	26	3.18	3.15	51	-	3.18
↓	-	-	↓	3.18	3.16	↓	-	3.16
2	-	-	27	3.18	3.18	52	-	3.17
↓	-	-	↓	3.19	3.16	↓	-	3.17
3	-	-	28	3.19	3.16	53	-	3.17
↓	-	-	↓	3.17	3.17	↓	-	3.17
4	-	-	29	3.18	3.16	54	-	3.15
↓	-	-	↓	3.17	3.18	↓	-	3.16
5	-	-	30	3.17	3.16	55	-	3.17
↓	-	-	↓	3.17	3.17	↓	-	3.16
6	-	-	31	3.17	3.16	56	-	3.12
↓	-	-	↓	3.17	3.16	↓	-	3.12
7	-	-	32	3.16	3.15	57	-	3.15
↓	-	-	↓	3.18	3.15	↓	-	3.15
8	-	-	33	3.19	3.15	58	-	3.19
↓	-	-	↓	3.17	3.16	↓	-	3.19
9	-	-	34	3.16	3.17	59	-	3.15
↓	-	-	↓	3.17	3.17	↓	-	3.17
10	-	-	35	3.18	3.16	60	-	3.15
↓	-	-	↓	3.18	3.18	↓	-	3.18
11	-	-	36	3.17	3.16	61	-	-
↓	-	-	↓	3.18	3.16	↓	-	-
12	-	-	37	3.18	3.17	図面寸法 ■■■■mm		
↓	-	-	↓	3.19	3.14			
13	-	-	38	3.19	3.15	未使用品線径 (新品) ■■■■mm		
↓	-	-	↓	3.20	3.15			
14	-	-	39	3.19	3.15	使用計測器 デジタルノギス		
↓	-	-	↓	3.18	3.17			
15	-	-	40	3.19	3.17			
↓	-	-	↓	3.18	3.15			
16	-	-	41	3.19	3.16			
↓	-	止端	↓	3.19	3.15			
17	-	3.18	42	3.17	3.16			
↓	-	3.17	↓	3.19	3.16			
18	-	3.16	43	3.17	3.16			
↓	-	3.17	↓	3.19	3.17			
19	-	3.16	44	3.19	3.16			
↓	-	3.16	↓	3.19	3.16			
20	-	3.17	45	3.20	3.17			
↓	止端	3.17	↓	3.19	3.15			
21	3.19	3.16	46	3.18	3.16			
↓	3.18	3.17	↓	3.17	止端			
22	3.18	3.15	47	3.18	3.18			
↓	3.17	3.16	↓	3.17	3.16			
23	3.18	3.16	48	3.15	3.12			
↓	3.18	3.15	↓	3.17	3.14			
24	3.18	3.17	49	3.16	3.20			
↓	3.16	3.17	↓	3.15	3.17			
25	3.17	3.16	50	3.17	3.20			
↓	3.18	3.19	↓	止端	3.17			

注1 : R側の「-」は脱落し、場所を特定できないため計測していない。  
 注2 : 「↓」は前後数字 (翼) の中間を計測した結果を示す (例 : 「1↓2」であれば翼No.1とNo.2の中間)  
 注3 : 表中の赤太文字は、最小値を示す。

表-8 レーシングワイヤ (L側) 線径計測結果

L側線径								
翼No.	内	外	翼No.	内	外	翼No.	内	外
1	3.17	3.16	26	3.15	3.16	51	3.15	3.17
↓	3.17	3.17	↓	3.16	3.16	↓	3.17	3.15
2	3.17	3.16	27	3.16	3.14	52	3.19	3.16
↓	3.16	3.17	↓	3.16	3.16	↓	3.21	3.17
3	3.17	3.17	28	3.16	3.16	53	3.19	3.16
↓	3.16	3.17	↓	3.17	3.15	↓	3.17	3.17
4	3.16	3.16	29	3.15	3.14	54	3.17	3.16
↓	3.17	3.18	↓	3.16	3.15	↓	3.18	3.18
5	3.18	3.16	30	3.16	3.15	55	3.16	3.18
↓	3.17	3.18	↓	3.17	3.16	↓	3.19	3.16
6	3.17	3.17	31	3.17	3.15	56	3.16	3.15
↓	3.17	3.18	↓	3.17	3.16	↓	3.19	3.18
7	3.17	3.16	32	3.17	3.15	57	3.17	3.15
↓	3.16	3.17	↓	3.16	3.15	↓	3.17	3.17
8	3.17	3.16	33	3.17	3.16	58	3.17	3.16
↓	3.17	3.17	↓	3.17	3.15	↓	3.17	3.17
9	3.17	3.16	34	3.16	3.15	59	3.17	3.16
↓	3.17	3.17	↓	3.16	3.15	↓	3.17	3.16
10	3.17	3.17	35	3.17	3.15	60	3.17	3.15
↓	3.17	3.16	↓	3.17	3.16	↓	3.17	3.17
11	3.17	3.17	36	3.16	3.15	61	3.17	3.15
↓	3.17	3.17	↓	3.17	3.16	↓	3.17	3.17
12	3.17	3.17	37	3.17	3.15	図面寸法 mm		
↓	3.17	3.17	↓	3.16	3.16			
13	3.17	3.17	38	3.17	3.15	未使用品線径 (新品) mm		
↓	3.17	3.17	↓	3.16	3.15			
14	3.16	3.15	39	3.17	3.15	使用計測器 デジタルノギス		
↓	3.16	3.16	↓	3.16	3.15			
15	3.17	3.15	40	3.17	3.15			
↓	3.17	3.15	↓	3.16	3.17			
16	3.16	3.15	41	3.18	3.16			
↓	3.16	止端	↓	3.18	3.17			
17	3.16	3.18	42	3.17	3.16			
↓	3.18	3.17	↓	3.16	3.16			
18	3.16	3.16	43	3.15	3.17			
↓	3.17	3.17	↓	3.15	3.17			
19	3.16	3.17	44	3.15	3.17			
↓	3.16	3.18	↓	3.15	3.16			
20	3.16	3.17	45	3.15	3.17			
↓	止端	3.18	↓	3.17	3.17			
21	3.17	3.17	46	3.16	3.16			
↓	3.17	3.17	↓	3.16	止端			
22	3.16	3.17	47	3.16	3.17			
↓	3.17	3.17	↓	3.16	3.17			
23	3.17	3.17	48	3.16	3.17			
↓	3.17	3.17	↓	3.16	3.18			
24	3.17	3.16	49	3.17	3.17			
↓	3.16	3.17	↓	3.16	3.17			
25	3.16	3.17	50	3.18	3.19			
↓	3.17	3.15	↓	止端	3.18			

注1: 「↓」は前後数字 (翼) の中間を計測した結果を示す (例: 「1↓2」であれば翼No.1とNo.2の中間)

注2: 表中の赤太文字は、最小値を示す。

タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因12】レーシングワイヤ孔径及び孔高さ

レーシングワイヤ孔径及び孔高さが部分的に設計値を逸脱し、隣接するタービンプレード間を貫通しているレーシングワイヤが傾くことで、ファツリ一部くびれ部の応力を高め、き裂発生の原因となる可能性がある。

(1) 調査内容及び判定基準

- ・レーシングワイヤ孔の現品計測を実施し、レーシングワイヤ孔径及び孔高さが設計値内であること

(2) 点検結果

- ・孔径計測結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	レーシングワイヤ孔	異常なし※12	2018/11/15	表-9~12

※12 レーシングワイヤ孔の現品計測を実施した結果、レーシングワイヤ孔径の計測結果で一部φ $\blacksquare$ ピンゲージを通るものが確認されているが、メーカーに聞き取りした結果、レーシングワイヤ孔径の設計値逸脱は、製造時に全数検査を行っていることから運転中の摩耗が原因であると考えられ、一部のレーシングワイヤ孔が拡大したものと考える。

- ・孔高さ計測結果

	点検対象	結果	点検日	備考
2	レーシングワイヤ孔	異常あり※13	2019/1/22	表-13、14、15

※13 レーシングワイヤ孔高さについて設計値を逸脱し隣接するタービンプレードとの高低差が大きい箇所があることを確認した。レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱の原因を調査した結果、製作時の加工不良である可能性が高いことを確認した。そのため、レーシングワイヤ穴高さの設定値逸脱の原因を調査した結果、「別紙-3 タービンプレードレーシングワイヤ孔加工に関する確認結果」に示すとおり、製作時の加工不良である可能性が高いことを確認した。(別紙-3参照)

表-9 レーシングワイヤ孔径 (R側外側) 点検結果

判定基準	レーシングワイヤ孔に図面指示寸法 $\phi$ [ ] の下限 $\phi$ [ ] ピンゲージが滑らかに通り、かつ $\phi$ [ ] ピンゲージが通らないこと。
------	---

管理 No.	$\phi$ [ ]	$\phi$ [ ]
翼 No. 1	折損翼 (※1)	
翼 No. 2	調査中 (※2)	
翼 No. 3	良	良
翼 No. 4	良	良
翼 No. 5	良	良
翼 No. 6	否	良
翼 No. 7	良	良
翼 No. 8	良	良
翼 No. 9	良	良
翼 No. 10	否	良
翼 No. 11	良	良
翼 No. 12	良	良
翼 No. 13	良	良
翼 No. 14	良	良
翼 No. 15	良	良
翼 No. 16	良	良
翼 No. 17	良	良
翼 No. 18	良	良
翼 No. 19	否	良
翼 No. 20	良	良

管理 No.	$\phi$ [ ]	$\phi$ [ ]
翼 No. 21	良	良
翼 No. 22	良	良
翼 No. 23	良	良
翼 No. 24	良	良
翼 No. 25	良	良
翼 No. 26	良	良
翼 No. 27	良	良
翼 No. 28	否	良
翼 No. 29	否	良
翼 No. 30	良	良
翼 No. 31	良	良
翼 No. 32	否	良
翼 No. 33	否	良
翼 No. 34	良	良
翼 No. 35	良	良
翼 No. 36	良	良
翼 No. 37	良	良
翼 No. 38	良	良
翼 No. 39	否	良
翼 No. 40	良	良

管理 No.	$\phi$ [ ]	$\phi$ [ ]
翼 No. 41	良	良
翼 No. 42	否	良
翼 No. 43	良	良
翼 No. 44	良	良
翼 No. 45	良	良
翼 No. 46	良	良
翼 No. 47	良	良
翼 No. 48	良	良
翼 No. 49	良	良
翼 No. 50	良	良
翼 No. 51	否	良
翼 No. 52	良	良
翼 No. 53	良	良
翼 No. 54	良	良
翼 No. 55	良	良
翼 No. 56	良	良
翼 No. 57	否	良
翼 No. 58	良	良
翼 No. 59	良	良
翼 No. 60	良	良
翼 No. 61	否	良

※1 : 折損した翼で孔の形状が健全でないため計測していない。  
 ※2 : 研究所にて詳細調査対象の翼であり、計測していない。

表-10 レーシングワイヤ孔径 (R側内側) 点検結果

判定基準	レーシングワイヤ孔に図面指示寸法 $\phi$ [ ] の下限 $\phi$ [ ] ピンゲージが滑らかに通り、かつ $\phi$ [ ] ピンゲージが通らないこと。
------	---

管理 No.	$\phi$ [ ]	$\phi$ [ ]
翼 No. 1	折損翼 (※1)	
翼 No. 2	調査中 (※2)	
翼 No. 3	否	良
翼 No. 4	良	良
翼 No. 5	良	良
翼 No. 6	否	良
翼 No. 7	否	良
翼 No. 8	良	良
翼 No. 9	否	良
翼 No. 10	否	良
翼 No. 11	否	良
翼 No. 12	否	良
翼 No. 13	否	良
翼 No. 14	良	良
翼 No. 15	良	良
翼 No. 16	良	良
翼 No. 17	良	良
翼 No. 18	良	良
翼 No. 19	否	良
翼 No. 20	良	良

管理 No.	$\phi$ [ ]	$\phi$ [ ]
翼 No. 21	良	良
翼 No. 22	良	良
翼 No. 23	良	良
翼 No. 24	良	良
翼 No. 25	良	良
翼 No. 26	良	良
翼 No. 27	良	良
翼 No. 28	否	良
翼 No. 29	否	良
翼 No. 30	良	良
翼 No. 31	否	良
翼 No. 32	否	良
翼 No. 33	否	良
翼 No. 34	良	良
翼 No. 35	良	良
翼 No. 36	良	良
翼 No. 37	良	良
翼 No. 38	否	良
翼 No. 39	否	良
翼 No. 40	良	良

管理 No.	$\phi$ [ ]	$\phi$ [ ]
翼 No. 41	良	良
翼 No. 42	否	良
翼 No. 43	良	良
翼 No. 44	良	良
翼 No. 45	良	良
翼 No. 46	否	良
翼 No. 47	良	良
翼 No. 48	否	良
翼 No. 49	否	良
翼 No. 50	良	良
翼 No. 51	否	良
翼 No. 52	良	良
翼 No. 53	良	良
翼 No. 54	良	良
翼 No. 55	否	良
翼 No. 56	良	良
翼 No. 57	否	良
翼 No. 58	否	良
翼 No. 59	良	良
翼 No. 60	良	良
翼 No. 61	良	否

※1 : 折損した翼で孔の形状が健全でないため計測していない。  
 ※2 : 研究所にて詳細調査対象の翼であり、計測していない。

表-11 レーシングワイヤ孔径 (L側外側) 点検結果

判定基準	レーシングワイヤ孔に図面指示寸法 $\phi$ [ ] の下限 $\phi$ [ ] ピンゲージが滑らかに通り、かつ $\phi$ [ ] ピンゲージが通らないこと。
------	---

管理 No.	$\phi$ [ ]	$\phi$ [ ]
翼 No. 1	良	良
翼 No. 2	良	良
翼 No. 3	否	良
翼 No. 4	否	良
翼 No. 5	良	良
翼 No. 6	良	良
翼 No. 7	良	良
翼 No. 8	否	良
翼 No. 9	良	良
翼 No. 10	良	良
翼 No. 11	良	良
翼 No. 12	良	良
翼 No. 13	良	良
翼 No. 14	良	良
翼 No. 15	良	良
翼 No. 16	良	良
翼 No. 17	良	良
翼 No. 18	良	良
翼 No. 19	良	良
翼 No. 20	否	良

管理 No.	$\phi$ [ ]	$\phi$ [ ]
翼 No. 21	良	良
翼 No. 22	良	良
翼 No. 23	良	良
翼 No. 24	良	良
翼 No. 25	良	良
翼 No. 26	良	良
翼 No. 27	否	良
翼 No. 28	良	良
翼 No. 29	良	良
翼 No. 30	否	良
翼 No. 31	良	良
翼 No. 32	否	良
翼 No. 33	良	良
翼 No. 34	良	良
翼 No. 35	良	良
翼 No. 36	良	良
翼 No. 37	良	良
翼 No. 38	良	良
翼 No. 39	否	良
翼 No. 40	良	良

管理 No.	$\phi$ [ ]	$\phi$ [ ]
翼 No. 41	良	良
翼 No. 42	否	良
翼 No. 43	良	良
翼 No. 44	良	良
翼 No. 45	良	良
翼 No. 46	良	良
翼 No. 47	良	良
翼 No. 48	良	良
翼 No. 49	否	良
翼 No. 50	否	良
翼 No. 51	否	良
翼 No. 52	否	良
翼 No. 53	良	良
翼 No. 54	良	良
翼 No. 55	否	良
翼 No. 56	良	良
翼 No. 57	良	良
翼 No. 58	良	良
翼 No. 59	良	良
翼 No. 60	良	良
翼 No. 61	良	良

表-12 レーシングワイヤ孔径 (L側内側) 点検結果

判定基準	レーシングワイヤ孔に図面指示寸法 $\phi$ [ ] の下限 $\phi$ [ ] ピンゲージが滑らかに通り、かつ $\phi$ [ ] ピンゲージが通らないこと。
------	---

管理 No.	$\phi$ [ ]	$\phi$ [ ]
翼 No. 1	良	良
翼 No. 2	良	良
翼 No. 3	否	良
翼 No. 4	否	良
翼 No. 5	良	良
翼 No. 6	良	良
翼 No. 7	良	良
翼 No. 8	否	良
翼 No. 9	良	良
翼 No. 10	良	良
翼 No. 11	良	良
翼 No. 12	良	良
翼 No. 13	良	良
翼 No. 14	良	良
翼 No. 15	良	良
翼 No. 16	良	良
翼 No. 17	良	良
翼 No. 18	良	良
翼 No. 19	否	良
翼 No. 20	良	良

管理 No.	$\phi$ [ ]	$\phi$ [ ]
翼 No. 21	良	良
翼 No. 22	良	良
翼 No. 23	良	良
翼 No. 24	良	良
翼 No. 25	否	良
翼 No. 26	良	良
翼 No. 27	否	良
翼 No. 28	良	良
翼 No. 29	良	良
翼 No. 30	良	良
翼 No. 31	良	良
翼 No. 32	否	良
翼 No. 33	否	良
翼 No. 34	良	良
翼 No. 35	良	良
翼 No. 36	良	良
翼 No. 37	否	良
翼 No. 38	良	良
翼 No. 39	否	良
翼 No. 40	良	良

管理 No.	$\phi$ [ ]	$\phi$ [ ]
翼 No. 41	良	良
翼 No. 42	否	良
翼 No. 43	良	良
翼 No. 44	良	良
翼 No. 45	良	良
翼 No. 46	良	良
翼 No. 47	良	良
翼 No. 48	良	良
翼 No. 49	良	良
翼 No. 50	否	良
翼 No. 51	否	良
翼 No. 52	否	良
翼 No. 53	良	良
翼 No. 54	良	良
翼 No. 55	否	良
翼 No. 56	良	良
翼 No. 57	良	良
翼 No. 58	良	良
翼 No. 59	良	良
翼 No. 60	良	良
翼 No. 61	良	良

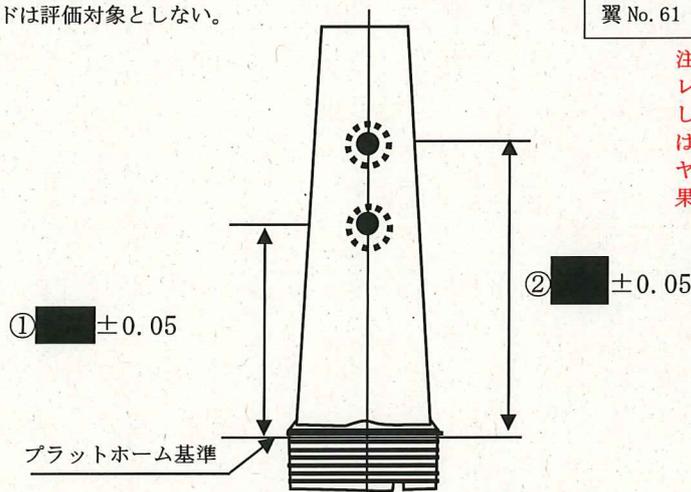
表-13 レーシングワイヤ孔高さ (R側) 点検結果

判定基準	レーシングワイヤ孔を $\phi$ [ ] mmと仮定し、高さ計測値に加算した計算値から図面指示高さ寸法を比較する。 プラットホーム基準からの「高さ寸法① [ ] $\pm 0.05$ 」、「高さ寸法② [ ] $\pm 0.05$ 」をそれぞれ満足していること。
------	---

管理 No.	計算値①	計算値②	結果	管理 No.	計算値①	計算値②	結果	管理 No.	計算値①	計算値②	結果
翼 No. 1	-	67.67	参考値	翼 No. 21	47.83	66.68	否	翼 No. 41	※客先殿調査品		-
翼 No. 2	47.80	66.69	否	翼 No. 22	47.83	66.70	否	翼 No. 42	※客先殿調査品		-
翼 No. 3	※治具に入らず		-	翼 No. 23	47.79	66.68	否	翼 No. 43	※客先殿調査品		-
翼 No. 4	47.83	66.69	否	翼 No. 24	47.85	66.69	良	翼 No. 44	※客先殿調査品		-
翼 No. 5	48.48	67.33	否	翼 No. 25	47.87	66.69	良	翼 No. 45	※客先殿調査品		-
翼 No. 6	47.80	66.65	否	翼 No. 26	※治具に入らず		-	翼 No. 46	47.78	66.67	否
翼 No. 7	47.82	66.68	否	翼 No. 27	47.77	66.68	否	翼 No. 47	47.81	66.69	否
翼 No. 8	47.80	66.68	否	翼 No. 28	47.84	66.69	否	翼 No. 48	47.79	66.68	否
翼 No. 9	47.75	66.71	否	翼 No. 29	47.81	66.71	否	翼 No. 49	47.81	66.70	否
翼 No. 10	※治具に入らず		-	翼 No. 30	47.87	66.66	良	翼 No. 50	47.83	66.69	否
翼 No. 11	47.78	66.68	否	翼 No. 31	47.78	66.67	否	翼 No. 51	47.87	66.70	良
翼 No. 12	47.79	66.68	否	翼 No. 32	47.88	66.62	否	翼 No. 52	※治具に入らず		-
翼 No. 13	47.79	66.69	否	翼 No. 33	※断面観察		-	翼 No. 53	47.80	66.70	否
翼 No. 14	48.66	67.45	否	翼 No. 34	※引張試験		-	翼 No. 54	※治具に入らず		-
翼 No. 15	47.80	66.68	否	翼 No. 35	※引張試験		-	翼 No. 55	47.79	66.68	否
翼 No. 16	47.80	66.64	否	翼 No. 36	※引張試験		-	翼 No. 56	47.86	66.70	良
翼 No. 17	47.84	66.68	否	翼 No. 37	47.83	66.69	否	翼 No. 57	47.77	66.72	否
翼 No. 18	47.81	66.70	否	翼 No. 38	47.80	66.68	否	翼 No. 58	47.95	66.81	否
翼 No. 19	47.82	66.71	否	翼 No. 39	47.79	66.68	否	翼 No. 59	48.86	67.67	否
翼 No. 20	47.82	66.70	否	翼 No. 40	47.77	66.69	否	翼 No. 60	47.95	66.45	否
								翼 No. 61	-	66.75	参考値

※印の付したタービンブレードは評価対象としない。

注: No. 1 はブレード先端から外側レーシングワイヤ孔位置を計測した値より算出しており、No. 61 はブレード及びレーシングワイヤ孔が変形していることから結果は参考値とする



レーシングワイヤ孔高さ 計測箇所詳細

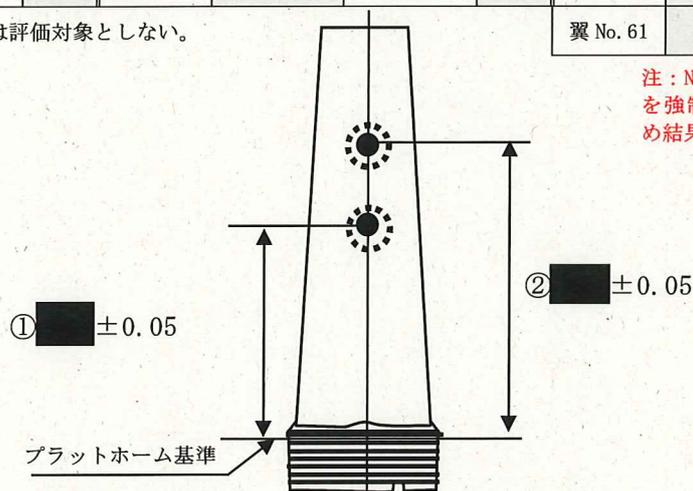
表-14 レーシングワイヤ孔高さ (L側) 点検結果

判定基準	レーシングワイヤ孔を $\phi$ [ ] mmと仮定し、高さ計測値に加算した計算値から図面指示高さ寸法を比較する。 プラットホーム基準からの「高さ寸法① [ ] $\pm 0.05$ 」、「高さ寸法② [ ] $\pm 0.05$ 」をそれぞれ満足していること。
------	---

管理 No.	計算値①	計算値②	結果	管理 No.	計算値①	計算値②	結果	管理 No.	計算値①	計算値②	結果
翼 No. 1	47.83	66.71	否	翼 No. 21	47.83	66.71	否	翼 No. 41	※治具に入らず		—
翼 No. 2	47.83	66.66	否	翼 No. 22	47.83	66.67	否	翼 No. 42	47.84	66.62	否
翼 No. 3	47.94	66.76	否	翼 No. 23	47.84	66.72	否	翼 No. 43	47.81	66.66	否
翼 No. 4	47.95	66.77	否	翼 No. 24	47.82	66.68	否	翼 No. 44	47.83	66.69	否
翼 No. 5	47.81	66.70	否	翼 No. 25	49.44	68.21	参考値	翼 No. 45	47.81	66.69	否
翼 No. 6	47.81	66.68	否	翼 No. 26	47.81	66.65	否	翼 No. 46	47.84	66.69	否
翼 No. 7	47.83	66.70	否	翼 No. 27	47.85	66.72	良	翼 No. 47	47.83	66.65	否
翼 No. 8	47.81	66.66	否	翼 No. 28	47.84	66.68	否	翼 No. 48	※治具に入らず		—
翼 No. 9	47.92	66.67	良	翼 No. 29	47.82	66.73	否	翼 No. 49	47.82	66.57	否
翼 No. 10	47.81	66.69	否	翼 No. 30	47.79	66.69	否	翼 No. 50	47.83	66.64	否
翼 No. 11	47.83	66.70	否	翼 No. 31	47.83	66.72	否	翼 No. 51	47.85	66.69	良
翼 No. 12	47.80	66.64	否	翼 No. 32	47.86	66.79	否	翼 No. 52	47.87	66.73	良
翼 No. 13	47.82	66.70	否	翼 No. 33	47.88	66.70	良	翼 No. 53	47.83	66.72	否
翼 No. 14	47.81	66.63	否	翼 No. 34	47.83	66.71	否	翼 No. 54	47.84	66.71	否
翼 No. 15	47.84	66.72	否	翼 No. 35	47.83	66.72	否	翼 No. 55	47.84	66.74	否
翼 No. 16	47.82	66.70	否	翼 No. 36	47.85	66.66	良	翼 No. 56	48.71	67.58	否
翼 No. 17	47.83	66.69	否	翼 No. 37	47.85	66.70	良	翼 No. 57	47.83	66.69	否
翼 No. 18	47.84	66.71	否	翼 No. 38	47.82	66.64	否	翼 No. 58	※治具に入らず		—
翼 No. 19	47.86	66.67	良	翼 No. 39	47.82	66.74	否	翼 No. 59	47.84	66.71	否
翼 No. 20	47.80	66.70	否	翼 No. 40	47.82	66.65	否	翼 No. 60	47.81	66.69	否
								翼 No. 61	47.83	66.72	否

※印の付したタービンブレードは評価対象としない。

注：No. 25 はファツリー部のき裂を強制開口したのち計測したため結果は参考値とする。



レーシングワイヤ孔高さ 計測箇所詳細

表-15 レーシングワイヤ孔高低差 (R側) (L側) 結果

レーシングワイヤ孔 高低差 (R側)

レーシングワイヤ孔 高低差 (L側)

管理No.	計算値①	高低差	管理No.	計算値②	高低差	管理No.	計算値①	高低差	管理No.	計算値②	高低差
異No.1	折損翼		異No.1	67.67	0.98	異No.1	47.83	0.00	異No.1	66.71	0.05
異No.2	47.80		異No.2	66.69		異No.2	47.83	0.11	異No.2	66.66	0.10
異No.3	治具に入らず		異No.3	治具に入らず		異No.3	47.94	0.01	異No.3	66.76	0.01
異No.4	47.83	0.65	異No.4	66.69	0.64	異No.4	47.95	0.14	異No.4	66.77	0.07
異No.5	48.48	0.68	異No.5	67.33	0.68	異No.5	47.81	0.00	異No.5	66.70	0.02
異No.6	47.80	0.02	異No.6	66.65	0.03	異No.6	47.81	0.02	異No.6	66.68	0.02
異No.7	47.82	0.02	異No.7	66.68	0.00	異No.7	47.83	0.02	異No.7	66.70	0.04
異No.8	47.80	0.05	異No.8	66.68	0.03	異No.8	47.81	0.11	異No.8	66.66	0.01
異No.9	47.75		異No.9	66.71		異No.9	47.92	0.11	異No.9	66.67	0.02
異No.10	治具に入らず		異No.10	治具に入らず		異No.10	47.81	0.02	異No.10	66.69	0.01
異No.11	47.78	0.01	異No.11	66.68	0.00	異No.11	47.83	0.03	異No.11	66.70	0.06
異No.12	47.79	0.00	異No.12	66.68	0.01	異No.12	47.80	0.02	異No.12	66.64	0.06
異No.13	47.79	0.87	異No.13	66.69	0.76	異No.13	47.82	0.01	異No.13	66.70	0.07
異No.14	48.66	0.86	異No.14	67.45	0.77	異No.14	47.81	0.03	異No.14	66.63	0.09
異No.15	47.80	0.00	異No.15	66.68	0.04	異No.15	47.84	0.02	異No.15	66.72	0.02
異No.16	47.80	0.04	異No.16	66.64	0.04	異No.16	47.82	0.01	異No.16	66.70	0.01
異No.17	47.84	0.03	異No.17	66.68	0.02	異No.17	47.83	0.01	異No.17	66.69	0.02
異No.18	47.81	0.01	異No.18	66.70	0.01	異No.18	47.84	0.02	異No.18	66.71	0.04
異No.19	47.82	0.00	異No.19	66.71	0.01	異No.19	47.86	0.06	異No.19	66.67	0.03
異No.20	47.82	0.01	異No.20	66.70	0.02	異No.20	47.80	0.03	異No.20	66.70	0.01
異No.21	47.83	0.00	異No.21	66.68	0.02	異No.21	47.83	0.00	異No.21	66.71	0.04
異No.22	47.83	0.04	異No.22	66.70	0.02	異No.22	47.83	0.01	異No.22	66.67	0.05
異No.23	47.79	0.06	異No.23	66.68	0.01	異No.23	47.84	0.02	異No.23	66.72	0.04
異No.24	47.85	0.02	異No.24	66.69	0.00	異No.24	47.82	1.62	異No.24	66.68	1.53
異No.25	47.87		異No.25	66.69		異No.25	49.44	1.63	異No.25	68.21	1.56
異No.26	治具に入らず		異No.26	治具に入らず		異No.26	47.81	0.04	異No.26	66.65	0.07
異No.27	47.77	0.07	異No.27	66.68	0.01	異No.27	47.85	0.01	異No.27	66.72	0.04
異No.28	47.84	0.03	異No.28	66.69	0.02	異No.28	47.84	0.02	異No.28	66.68	0.05
異No.29	47.81	0.06	異No.29	66.71	0.05	異No.29	47.82	0.03	異No.29	66.73	0.04
異No.30	47.87	0.09	異No.30	66.66	0.01	異No.30	47.79	0.04	異No.30	66.69	0.03
異No.31	47.78	0.10	異No.31	66.67	0.05	異No.31	47.83	0.03	異No.31	66.72	0.07
異No.32	47.88		異No.32	66.62		異No.32	47.86	0.02	異No.32	66.79	0.09
異No.33	破面観察		異No.33	破面観察		異No.33	47.88	0.05	異No.33	66.70	0.01
異No.34	引張試験		異No.34	引張試験		異No.34	47.83	0.00	異No.34	66.71	0.01
異No.35	引張試験		異No.35	引張試験		異No.35	47.83	0.02	異No.35	66.72	0.06
異No.36	引張試験		異No.36	引張試験		異No.36	47.85	0.00	異No.36	66.66	0.04
異No.37	47.83	0.03	異No.37	66.69	0.01	異No.37	47.85	0.03	異No.37	66.70	0.06
異No.38	47.80	0.01	異No.38	66.68	0.00	異No.38	47.82	0.00	異No.38	66.64	0.10
異No.39	47.79	0.02	異No.39	66.68	0.01	異No.39	47.82	0.00	異No.39	66.74	0.09
異No.40	47.77		異No.40	66.69		異No.40	47.82	0.00	異No.40	66.65	
異No.41	他調査で使用		異No.41	他調査で使用		異No.41	治具に入らず		異No.41	治具に入らず	
異No.42	他調査で使用		異No.42	他調査で使用		異No.42	47.84	0.03	異No.42	66.62	0.04
異No.43	他調査で使用		異No.43	他調査で使用		異No.43	47.81	0.02	異No.43	66.66	0.03
異No.44	他調査で使用		異No.44	他調査で使用		異No.44	47.83	0.02	異No.44	66.69	0.00
異No.45	他調査で使用		異No.45	他調査で使用		異No.45	47.81	0.03	異No.45	66.69	0.00
異No.46	47.78	0.03	異No.46	66.67	0.02	異No.46	47.84	0.01	異No.46	66.69	0.04
異No.47	47.81	0.02	異No.47	66.69	0.01	異No.47	47.83		異No.47	66.65	
異No.48	47.79	0.02	異No.48	66.68	0.02	異No.48	治具に入らず		異No.48	治具に入らず	
異No.49	47.81	0.02	異No.49	66.70	0.01	異No.49	47.82	0.01	異No.49	66.57	0.07
異No.50	47.83	0.04	異No.50	66.69	0.01	異No.50	47.83	0.02	異No.50	66.64	0.05
異No.51	47.87		異No.51	66.70		異No.51	47.95	0.02	異No.51	66.69	0.04
異No.52	治具に入らず		異No.52	治具に入らず		異No.52	47.87	0.04	異No.52	66.73	0.01
異No.53	47.80		異No.53	66.70		異No.53	47.83	0.01	異No.53	66.72	0.01
異No.54	治具に入らず		異No.54	治具に入らず		異No.54	47.84	0.00	異No.54	66.71	0.03
異No.55	47.79	0.07	異No.55	66.68	0.02	異No.55	47.84	0.87	異No.55	66.74	0.84
異No.56	47.86	0.09	異No.56	66.70	0.02	異No.56	48.71	0.88	異No.56	67.58	0.89
異No.57	47.77	0.18	異No.57	66.72	0.09	異No.57	47.83		異No.57	66.69	
異No.58	47.95	0.91	異No.58	66.81	0.86	異No.58	治具に入らず		異No.58	治具に入らず	
異No.59	48.86	0.91	異No.59	67.67	1.22	異No.59	47.84	0.03	異No.59	66.71	0.02
異No.60	47.95		異No.60	66.45	0.30	異No.60	47.81	0.02	異No.60	66.69	0.03
異No.61	損傷翼		異No.61	66.75	0.92	異No.61	47.83	0.00	異No.61	66.72	0.01

評価	レーシングワイヤ孔高さの点検結果より、隣接するタービンプレードとの高低差が大きい箇所が確認された
----	--

タービンブレード疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因 1 3】レーシングワイヤ取付

レーシングワイヤ止端部形状や取付状態に不良があると、き裂発生の起因となる可能性がある。

(1) 調査内容及び判定基準

- ・至近の本格点検記録により止端部形状や取付状態の点検結果を確認し、レーシングワイヤ止端部形状や取付状態に異常のないこと

(2) 点検結果

- ・止端部形状や取付状態点検結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	止端部形状	異常なし※14	2018/10/31	図－ 7、 8
2	取付状態	異常なし※14	2018/10/31	図－ 7、 8

※ 1 4 至近の第 7 回定検での本格点検記録（計測日：1994/11/1）を確認し、止端部形状や取付状態に異常がないことから、レーシングワイヤ取付に関する問題は確認されなかった。

単位：mm

計測位置	基準値	上 段	下 段
第 1 a		5. 4	6. 1
第 1 b		1. 6	1. 5
第 2 a		5. 9	6. 2
第 2 b		1. 2	1. 2

計測位置の第1は、インペラ固定キー側  
反対側を第2とする。

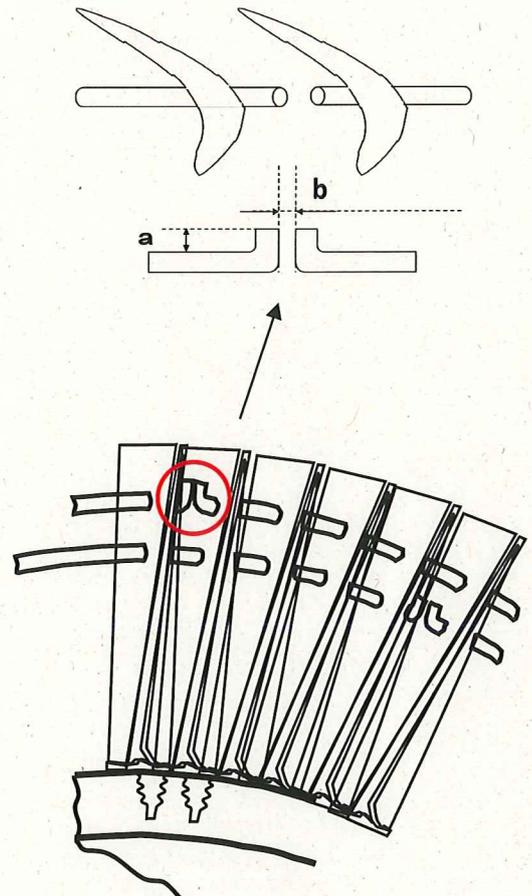


図-7 レーシングワイヤ止端部形状と取付状態  
レーシングワイヤR側

単位：mm

計測位置	基準値	上 段	下 段
第 1 a		5.6	5.4
第 1 b		1.3	1.4
第 2 a		5.4	5.8
第 2 b		1.2	1.2

計測位置の第1は、インペラ固定キー側  
反対側を第2とする。

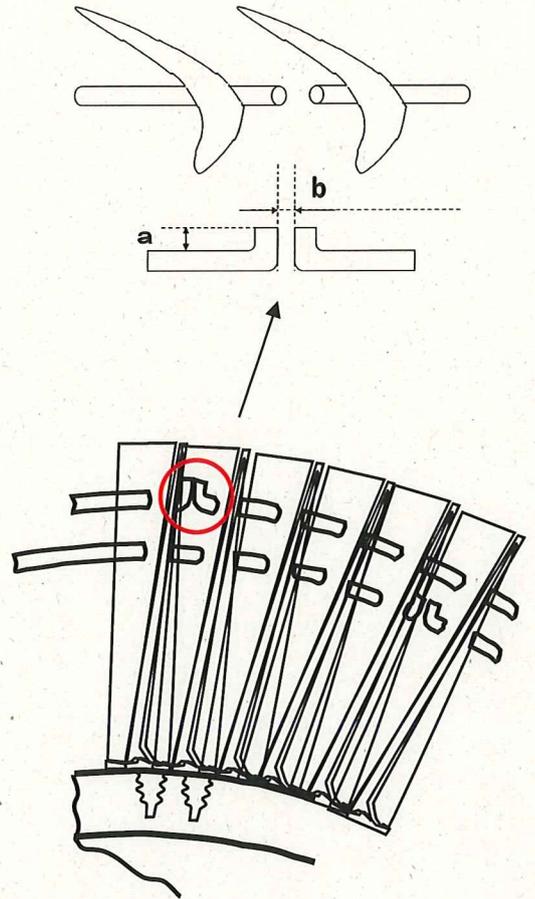


図-8 レーシングワイヤ止端部形状と取付状態  
レーシングワイヤL側

## タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

## 【要因 1 4】ブレード取外・取付作業

ブレードの取外・取付作業によって、ファツリー形状の変形や接触面の当たり状態が変化すると、き裂発生の原因となる可能性がある。

## (1) 調査内容及び判定基準

- ・過去の点検記録の確認及び外観目視点検を実施し、過去の点検時にタービンプレードの取外・取付作業によるファツリー形状の変形、接触面の当たり状態が変わった可能性について確認すること

## (2) 点検結果

- ・過去の点検記録の確認結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	点検記録	取外・取付 実績あり※15	2019/1/7	—

※ 1 5 当発電所 2 号機において発生した非常用ディーゼル発電機過給機の不具合に伴う水平展開として、当該 D/G 過給機のレーシングワイヤ孔の再加工工事の際に実施されていた。

- ・外観目視点検結果

	点検対象	結果	点検日	備考
2	ファツリー部	異常あり※16	2019/1/7	—

※ 1 6 L 側過給機のロータファツリー部端部に変形を確認。

## タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

## 【要因 1 5】腐食・汚れ

腐食・汚れによる経年変化により、タービンプレードファツリー部とロータファツリー一部間のクリアランス減少及び接触面の粗度が増加し、ファツリー部に応力が発生し、き裂発生の原因となる可能性がある。

## (1) 調査内容及び判定基準

- ・目視点検を実施し、腐食・汚れの有無を確認すること

## (2) 点検結果

- ・目視点検

	点検対象	結果	点検日	備考
1	ファツリー部	汚れあり※17	2018/10/17	－

※ 1 7 酸化スケール及び煤と思われる汚れを確認。ファツリー部間のクリアランスへ汚れが入り込むことによりファツリー部間の当たり状態が変化し、ファツリー部に歪みによる局部応力が発生した可能性がある。使用継続に伴い、腐食・汚れが増加することで、タービンプレードのき裂発生を助長した可能性があると考ええる。

## タービンプレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

## 【要因 1 6】 運転負荷

現在の当該D/G運転負荷状況については、問題は確認されていないが、過去に運転負荷上昇率の変更等の運用変更があった場合には、過給機への過負荷による過大応力を発生させ、き裂発生の原因となっていた可能性がある。

## (1) 調査内容及び判定基準

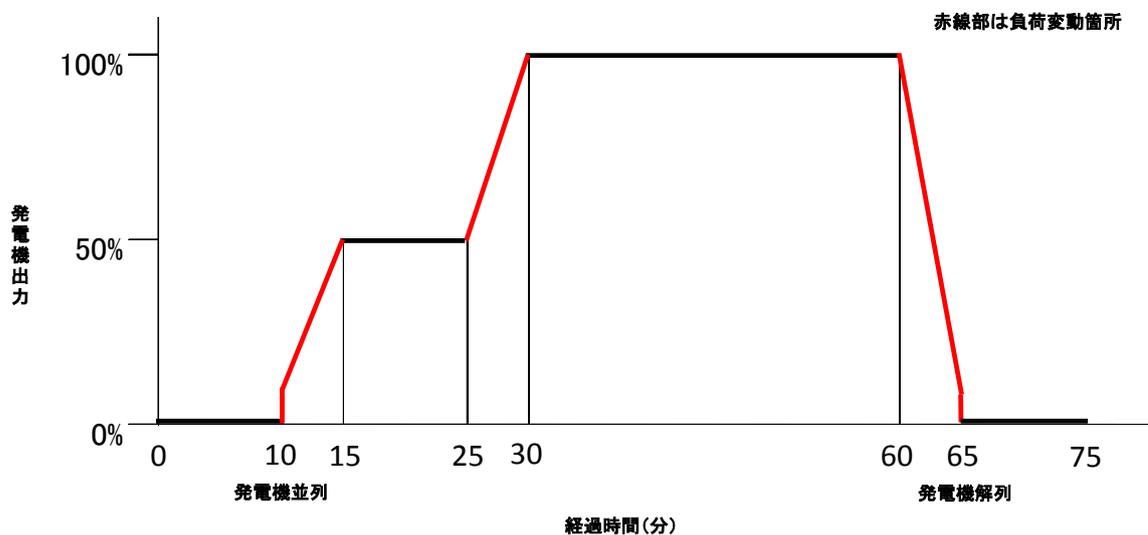
- ・過去の非常用ディーゼル発電機定例試験の出力上昇曲線について確認し、運転負荷上昇率に変更がないこと

## (2) 点検結果

- ・出力上昇曲線調査結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	出力上昇曲線	異常なし※18	2019/2/21	図－ 9

※ 1 8 納入から現時点に至るまで、発電機並列～定格負荷～発電機解列までの運用方法に変更はなく、運転負荷状況に関する問題は確認されなかった。



図－ 9 非常用ディーゼル発電機出力上昇曲線

## タービンブレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

## 【要因 1 7】 運転時間、起動回数

運転時間、起動回数が当該 D / G のみ過度に多い場合には、経年影響により、き裂発生  
の起因となる可能性がある。

## ( 1 ) 調査内容及び判定基準

- ・プラントの運転開始からの当該 D / G の総運転時間、起動回数について、非常用  
ディーゼル発電機 ( A ) と比較し、運転実績に特異性がないこと

## ( 2 ) 点検結果

- ・運転開始からの総運転時間、起動回数調査結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	総運転時間	異常なし <sup>19</sup>	2018/9/14	表 1 6
2	起動回数	異常なし <sup>19</sup>	2018/9/14	表 - 1 7

- 1 9 1号機以外の非常用ディーゼル発電機と比較し、特異性はなく、運転時間、起動  
回数に関する問題は確認されなかった。

表 - 1 6 非常用ディーゼル発電機総運転時間(2018/8/31 時点)

1号機	非常用ディーゼル 発電機 ( A )	非常用ディーゼル 発電機 ( B )
総運転時間 <sup>20</sup>	約 5 4 3 時間	約 5 6 2 時間

- 2 0 総運転時間は、定例試験記録より抽出し、建設時の試運転等は対象外

表 - 1 7 非常用ディーゼル発電機起動回数(2018/8/31 時点)

1号機	非常用ディーゼル 発電機 ( A )	非常用ディーゼル 発電機 ( B )
起動回数 <sup>21</sup>	4 2 3 回	4 3 7 回

- 2 1 起動回数は、定例試験記録より抽出し、建設時の起動回数等は対象外

(3) 起動・停止に伴う低サイクル疲労評価について

タービンファツリ一部について、0.2%耐力を超えている状態であることが確認されたことから、低サイクル疲労評価を実施し、タービンブレードのき裂の起因の可能性について評価を実施した。

今回の事象は、機関からの排ガス圧力の脈動に伴う発生応力の差を応力振幅とする疲労が原因と考えている。一方、起動→停止に伴う低サイクル疲労については、解析で計算された歪み値 (■%) を歪み-疲労線図にプロットした図を示す。この低サイクル評価は、始動→定格負荷状態→停止を1サイクルとして評価する。いくつかの歪み試験データが示されているが、その中でも最も厳しいTMF\*1 (Thermo-Mechanical Fatigue) の場合で■サイクル程度の疲労寿命があることが確認された。

非常用ディーゼル機関の設計仕様書での使用条件における起動回数は30年間で■回 (年間■回\*2×30年) であり、低サイクル疲労による疲労破壊には至らないと考えている。

※1 温度変化と歪みを同時に付加する疲労試験

※2 2週間に1回の始動試験、月1回の負荷試験を考慮した回数

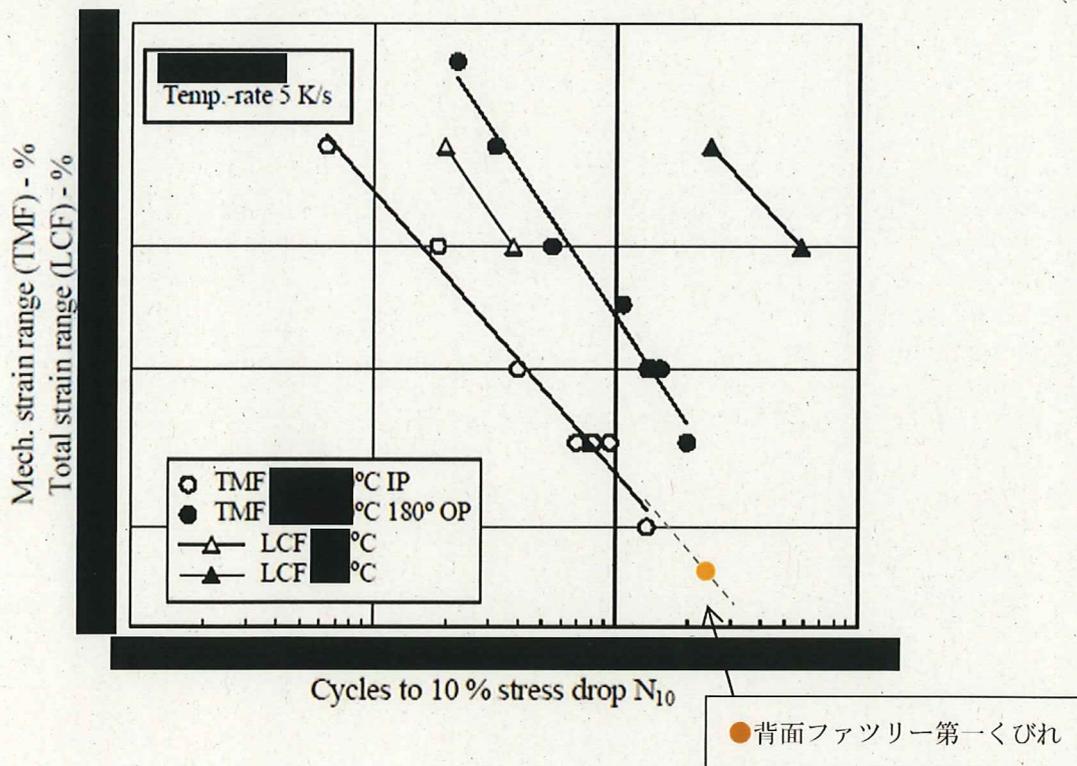


図-10 疲労-歪み線図 (定常運転条件)

## タービンブレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

## 【要因18】保守・整備

ロータシャフト取外・取付時に、ブレードを接触させると、き裂発生の起因となる可能性がある。

## ( 1 ) 調査内容及び判定基準

- ・ 前回の過給機本格点検記録を確認し、ブレードを接触させた等の記載がないこと

## ( 2 ) 点検結果

- ・ 本格点検記録調査結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	過給機本格点検記録	異常なし <sup>22</sup>	2018/10/31	-

22 前回の過給機本格点検記録（第14回定期検査、2005年）を調査したが、ブレードを接触させた等の記録はなく、保守・整備の影響に関する問題は確認されなかった。

タービンブレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因19】経時的变化

タービンブレードファツリー部及びロータファツリー部の寸法が経時的に変化することで、ファツリー部間のクリアランスにばらつきが生じ、ファツリー部接触部への応力が增大することで、き裂の起因となる可能性がある。

(1) 調査内容及び判定基準

- ・タービンブレードファツリー部及びロータファツリー部の三次元計測を実施し、寸法測定結果が設計値内にあること

(2) 点検結果

- ・三次元計測結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	タービンブレードファツリー部及びロータファツリー部	異常あり※23	2019/2/8	別紙-4

※23タービンブレードファツリー部の寸法が設計値を逸脱していることを確認。

ロータファツリー部の寸法が設計値を逸脱していることを確認。

摩耗による減肉や煤の付着による厚肉等も否定できないものの、経時的变化によりファツリー部間のクリアランスが変化していた可能性がある。

上記の点検結果を踏まえて、タービンブレードファツリー部及びロータブレードファツリー部の応力解析結果を図-11に示す。

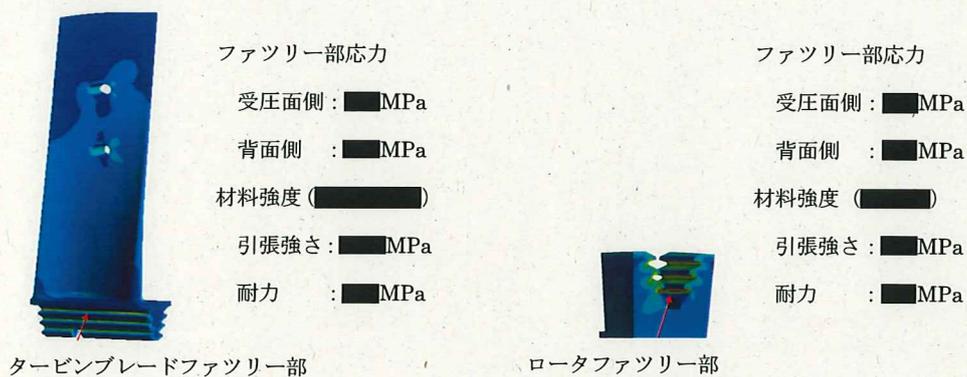


図-11 タービンブレードファツリー部及びロータファツリー部応力解析結果

図-11より、タービンブレードファツリー部は、当該D/G定格運転中は0.2%耐力を加味した弾性限度を逸脱することから、経時的な寸法変化が生じる。

(3) ロータファツリー部の材料特性について

ロータシャフトの材料である■■■■の■■■℃条件における疲労限度データがないことから、■■■■に比べ機械的性質は多少劣るが、相当材である■■■の引張強度データを使用し、■■■℃における引張強度：■■■MPa、耐力：■■■MPa、Y軸上の疲労限度は、鋼の一般的な耐久限度比として引張強度の 1/2 にて算出し■■■MPa とした疲労限度線図を以下に示す。(黄色の線)

また、■■■■と同じ JIS 規格の■■■耐熱鋼である■■■■について、■■■℃の条件での引張強度、疲労限度データを使用し、引張強度：■■■MPa、疲労限度：■■■MPa とした疲労限度線図を以下に示す。(緑色の線)

■■■■についても2つの線図の近傍であると推定しており、今回解析で求めたロータファツリー部の応力は、0.2%耐力及び疲労限度を超えないことを確認している。

なお、運転時のロータファツリー部の温度は約■■■℃であり、この温度で評価をしている。

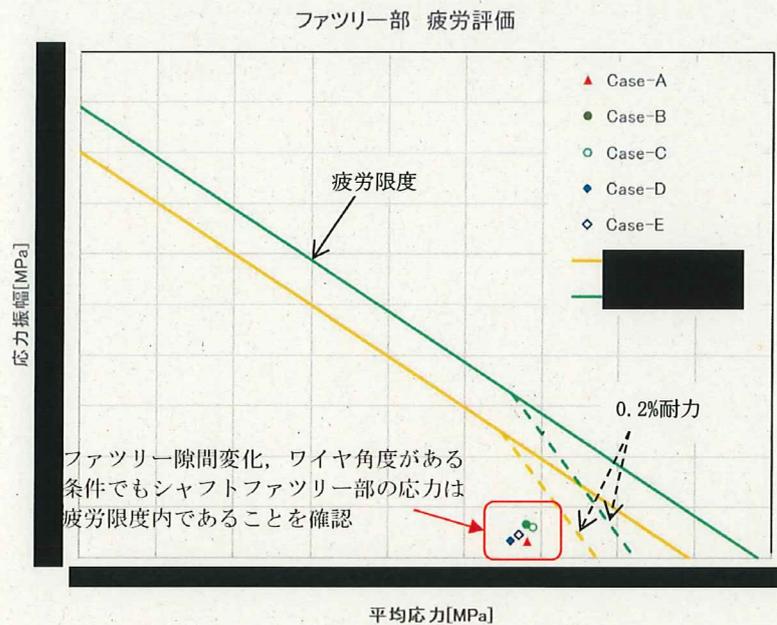


図-12 修正グッドマン線図

表-18 応力解析条件

記号	解析 Case-No	ファツリー 隙間 (mm)	ワイヤ角 (°)	平均応力 (MPa)	応力振幅 (MPa)	評価
▲	Case-A	通常				○
●	Case-B	背面のみ				○
○	Case-C	0.05mm 狭い				○
◆	Case-D	背面のみ				○
◇	Case-E	0.10mm 狭い				○

## (4) タービンプレードの経時的変化について

1回の運転において耐力を超える応力を受け、主に遠心方向に塑性変形を生じるが、タービンプレードファツリー部の変形は、タービンプレードファツリー部とロータファツリー部のクリアランスの中で変形し、タービンプレードファツリー部の歪みが一定の歪みとなるとそれ以上は変形しない。

また、設計どおりの使用状況においては使用時間や回転数に制限を設ける等の考慮は必要ないと考えている。

## (5) ファツリー部の出荷時の寸法検査について

ロータファツリー部の加工に使用するブローチカッターにて、テスト材をカットし、カットされたテスト材を設計図面と重ね、設計図面との公差を比較し許容範囲内であることを確認している(図-13)。また、ロータファツリー部製作後の最終確認としてモデルブレードを全数のロータファツリー部に通し確認をしている。

ブローチカッターはロータファツリー部 ■ 箇所を加工する毎に再研磨し、それを ■ 回繰り返した後に新品に交換をしており、新品交換時にテスト材をカットし公差を確認している。

なお、新品のブローチカッター使用時は-公差で製作され、ブローチカッターの消耗に伴い+公差に近づく。

タービンプレードファツリー部については、加工後に全数の第2くびれ部の寸法測定を行い寸法許容値内であることを確認している。

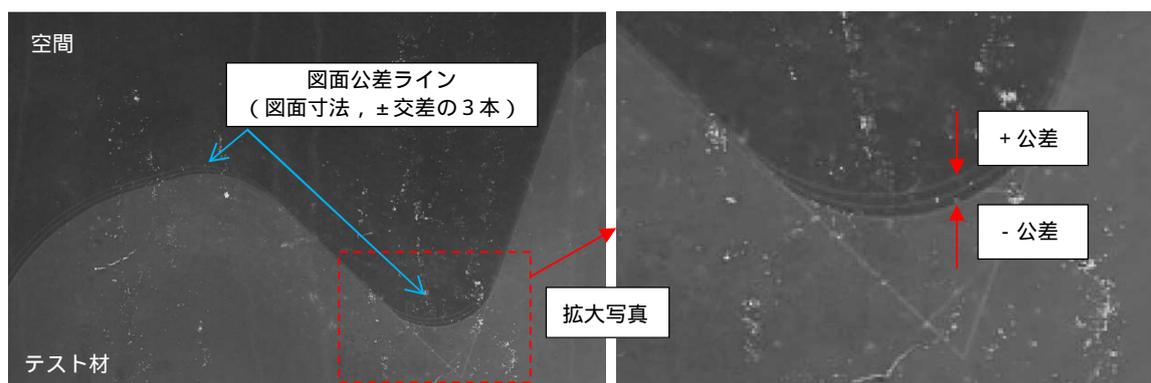


図 - 1 3 プロチカッター図面公差

## ( 6 ) ロータファツリ部寸法の設計値逸脱について

ロータファツリ部寸法の設計値逸脱については、ロータファツリ部の材料特性の確認結果より、ロータファツリ部は、弾性領域での使用であること、また、ロータファツリ部の製作時には、寸法測定は実施せずモデルブレードが全数のロータファツリ部に通ることの確認のみであることから、経時的な変化ではなく製作時の誤差によるものと考えらる。

過給機タービンプレード応力解析 レーシングワイヤ遠心力荷重の作用方向の検討

(1) 解析モデル

- ・ 過給機型式：[REDACTED]
  - ・ 解析ソフトウェア：ANSYS Mechanical Ver.18.0
- 解析モデルの詳細を以下に示す。

(2) 解析条件

- ・ 材料定義

解析で使用した材料物性値を表-1に示す。

表-1 解析モデルの物性値

品名	材質	密度 (Kg/m <sup>3</sup> )	ヤング率 (GPa)	線膨張係数 (1/°C)	出典
タービンプレード	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	※1
ロータシャフト	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	※2
レーシングワイヤ	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	※1

(出典) ※1：Total Materia Special Metal Corporation

※2：日本機械学会 金属材料の弾性係数

(3) 解析の境界条件

- ・ 解析の境界条件を図-1に示す。

A 周期対称境界：ロータシャフトの圧力面側と負圧面側を周期対称境界とする。

B 回転速度：工場試験データによる。

C 排ガス圧力：工場試験データによる。

D 周方向拘束：ロータシャフトの後縁側を周方向拘束とする。

E 軸方向拘束：ロータシャフトの前縁側を軸方向拘束とする。

F 外周側レーシングワイヤ遠心力：[REDACTED] N (1翼分のワイヤ質量×半径×角速度<sup>2</sup>より算出)

レーシングワイヤ半径 [REDACTED] mm

G 内周側レーシングワイヤ遠心力：[REDACTED] N (1翼分のワイヤ質量×半径×角速度<sup>2</sup>より算出)

レーシングワイヤ半径 [REDACTED] mm

解析の温度条件は過給機運転時の [REDACTED] °Cによる。

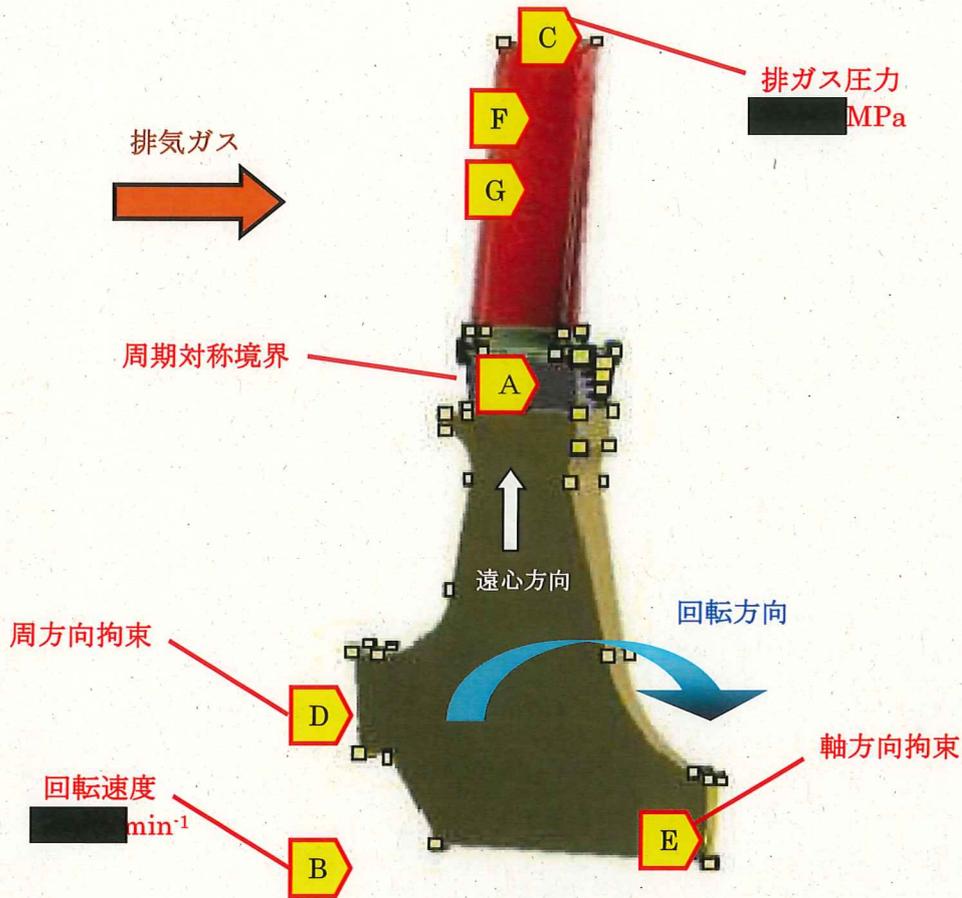


図-1 解析境界条件

・レーシングワイヤ遠心力作用方向

レーシングワイヤ遠心力作用方向は、図-2の $\theta$ 方向で、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ の3ケース解析する。

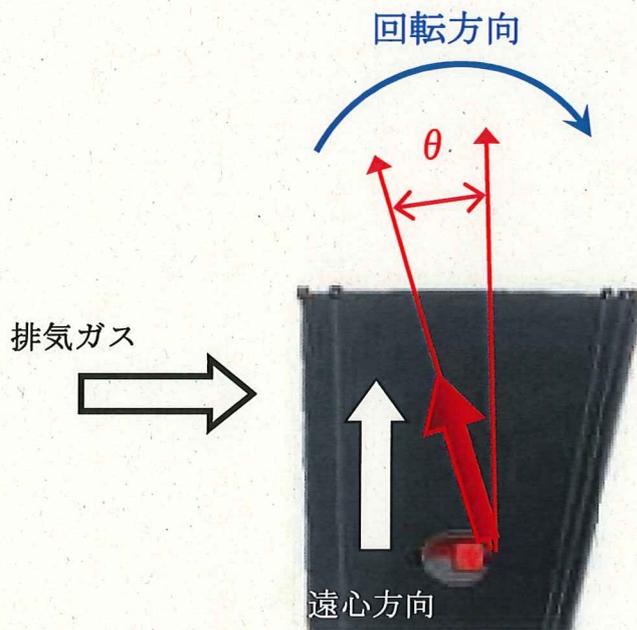


図-2 遠心力作用方向

(4) 解析結果

・付加荷重による解析結果の確認

レーシングワイヤをモデル化して解析した結果と、付加荷重/作用角度 $0^\circ$ で解析した結果を比較し、付加荷重による解析の妥当性を確認する。図-3にレーシングワイヤをモデル化して解析した結果、図-4にワイヤモデルを無くし、レーシングワイヤ孔外周部に作用方向 $0^\circ$ で遠心力荷重を付加して解析した結果を示す。2つの結果の比較により、付加荷重計算ではわずかに受圧面側の応力が低下し、背面側の応力が増加しているものの、ほぼ同じ結果が得られているものと判断した。

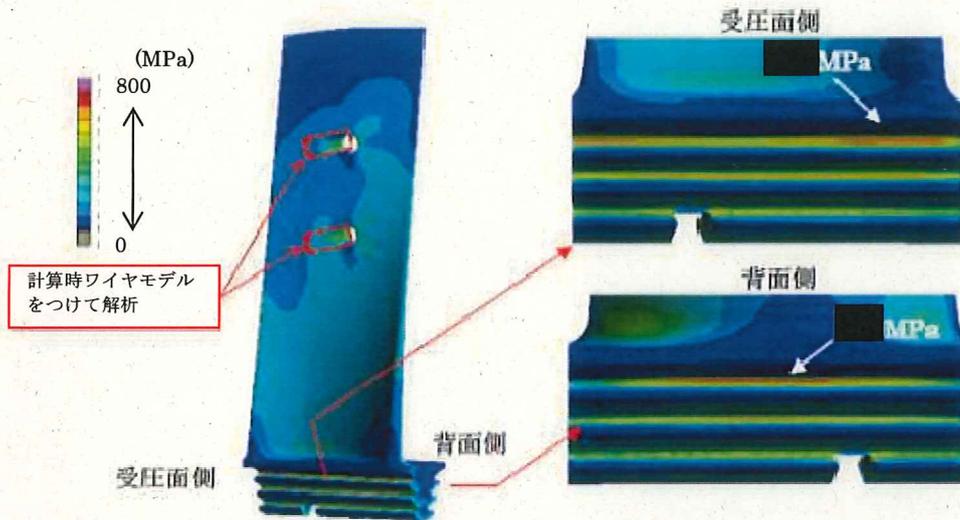


図-3 運転時の相当応力分布 (レーシングワイヤモデルで計算)

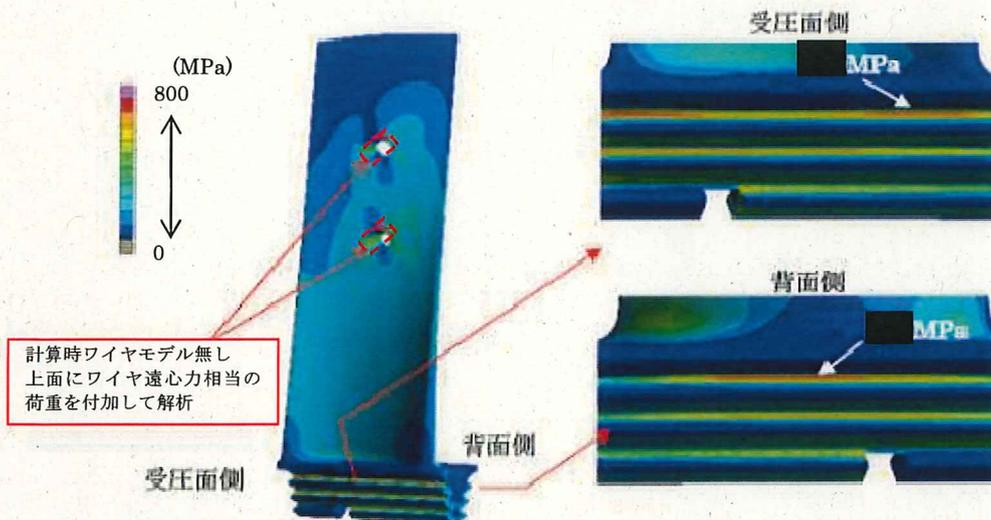


図-4 運転時の相当応力分布 (レーシングワイヤ付加荷重で計算)

・付加荷重の作用方向に傾きがある場合の解析結果

図-5に作用方向が5°、10°、15°のときのファツリー部の応力コンター図を示す。この結果より、レーシングワイヤによる遠心力の作用方向に傾きがある場合には、傾斜が付くほど、受圧面側ファツリー部の応力が低下し、背面側ファツリー部の応力が高まることが確認された。特に受圧面側については大きく応力が低下し、10°以上の傾きがある場合には、材料の弾性変形の範囲内となっている。表-2に解析結果をまとめた。

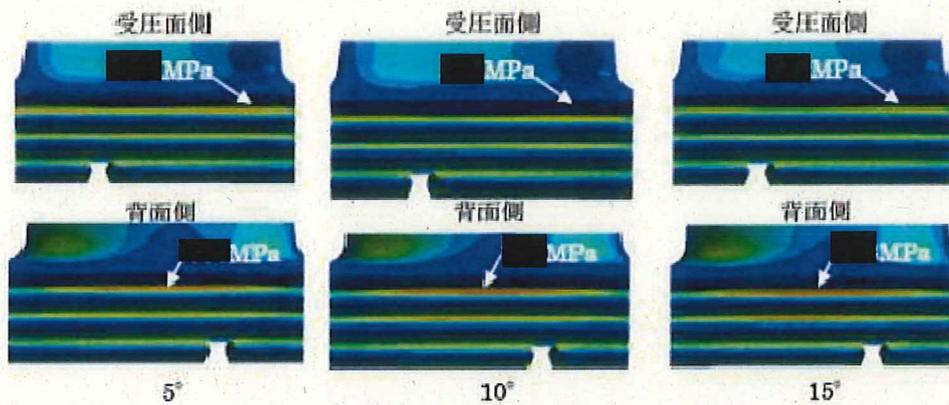


図-5 付加荷重方向の変化と相当応力分布

表-2 付加荷重による応力解析結果一覧 (単位: MPa)

No.	排ガス 圧力	ワイヤ モデル/ 付加荷重	付加荷重 作用角度	受圧面側 ファツリー部	背面側 ファツリー部	材料 0.2% 耐力	材料 引張 強度
1	あり	荷重なし	なし				
2	あり	モデル	なし				
3	あり	付加荷重	0°				
4	あり	付加荷重	5°				
5	あり	付加荷重	10°				
6	あり	付加荷重	15°				

・高サイクル疲労評価

付加荷重の作用方向に傾きを付けて計算した静的応力解析の結果について、レーシングワイヤの付加荷重の作用方向を0°及び15°傾けた場合について、ファツリー部第一くびれタービンブレードに生じる相当応力の差から平均応力と応力振幅を算出し、修正グッドマン線図にプロットした結果を図-6に示す。

タービンブレードに発生する平均応力と応力振幅は、作用角度が付いた場合にわずかに疲労限度に近づくものの疲労限度内にあることが確認された。

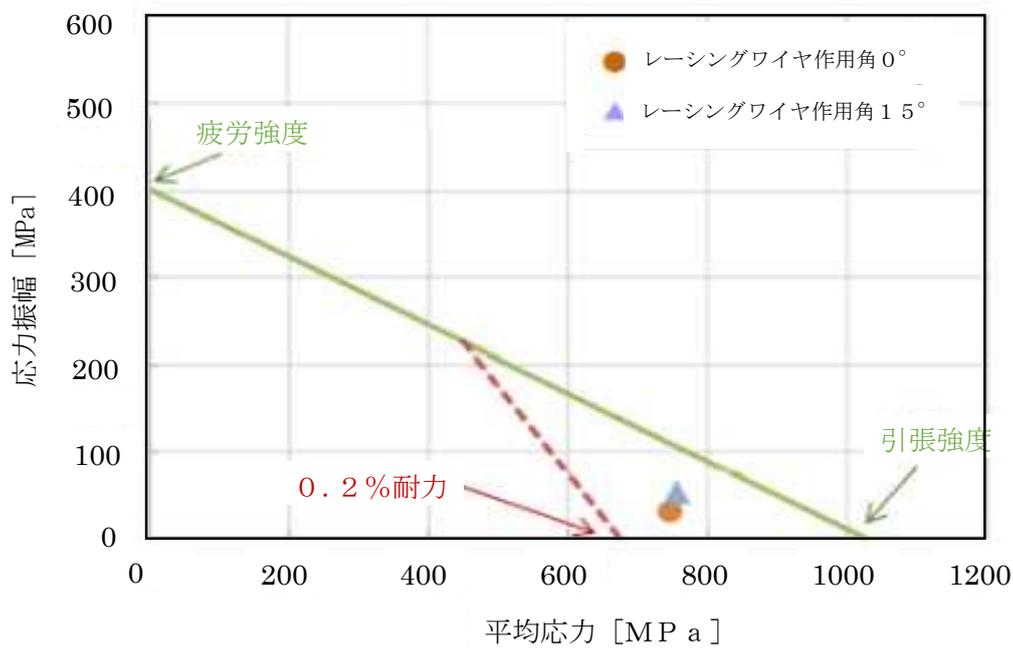


図-6 修正グッドマン線図

## 過給機ロータアッセンブリモデルによる固有値解析結果

起動・停止過程における過給機の過回転による過大応力（共振）の影響を確認するため、タービンブレードとロータシャフトのアッセンブリモデルにて固有値解析を実施した。なお、タービンブレードとロータシャフトのハンマリング試験を実施し、解析結果の妥当性を確認した。

### (1) 解析方法

- ・過給機型式：██████████
- ・解析ソフトウェア：ANSYS Mechanical Ver.18.0
- ・解析モデル：ロータアッセンブリ固有値解析モデル図を「図-1」に示す。

全てを3Dモデル化した場合には計算が収束しないことから、タービン翼数██████枚より1/██████カットモデルとした。一方でインペラを1/██████にカットすると計算できなかったことから、インペラのみフルモデルとし、その他は1/██████カットモデルにて計算を行った。

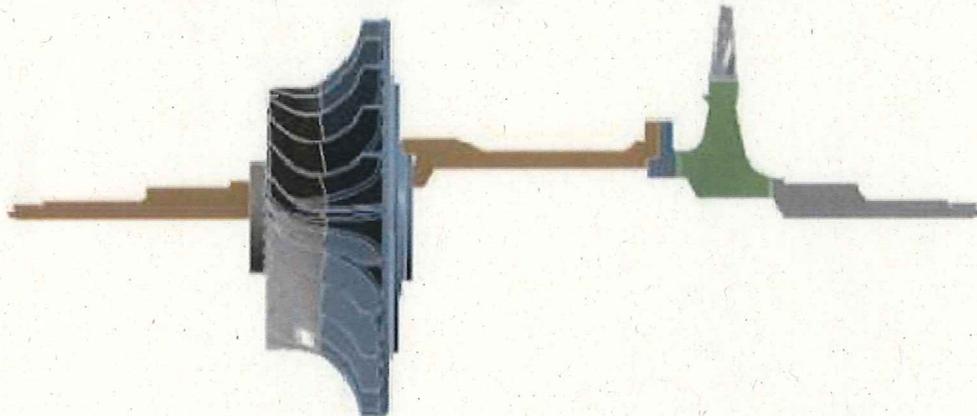


図-1 ロータアッセンブリ固有値解析モデル

### (2) 解析結果

固有値解析結果を「表-1」、過給機回転周波数を「表-2」、振動モード図を「図-2」に示す。

表-1 固有値解析結果

振動モード	固有値 (Hz)
1	██████████
2	██████████
3	██████████

表-2 過給機回転周波数

回転次数	回転周波数 (Hz)
1	██████████
2	██████████
3	██████████

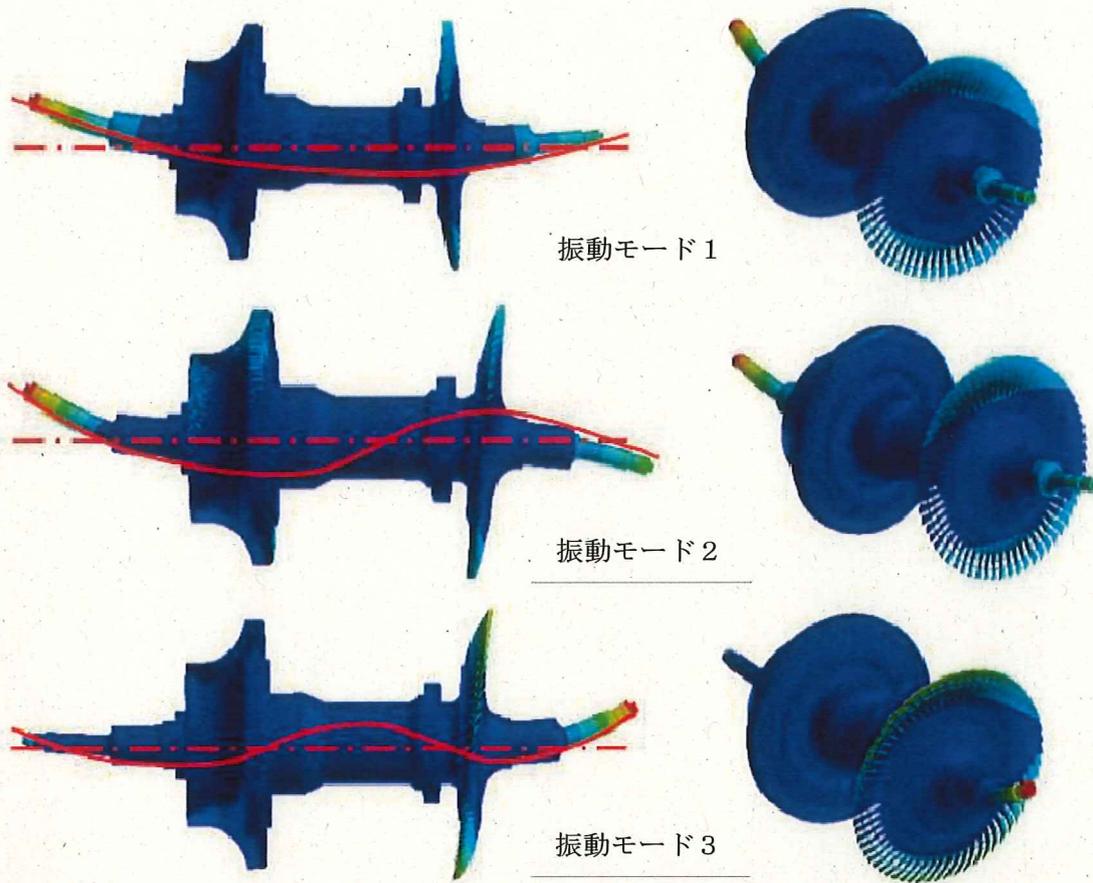


図-2 振動モード図

ロータアセンブリモデルによる固有値解析より、振動モード1の固有値は回転1次周波数より大きく、定格運転状態までの間には危険速度を通過しない結果となった。

また、「図-2 振動モード図」に示すとおり、タービンブレードの振れが大きくなる振動モード3の固有値は █████ Hz と高く、通常の運転において、このような振動状態にはならないものと思われる。

よって、ロータアセンブリモデルによる固有値解析にて過大な応力が発生しないことを確認した。

### (3) タービンブレードのハンマリング試験による固有振動数計測結果

#### ・計測方法

計測対象：外観より接触痕等の少ない極力健全なブレードとして下記6枚を選定

R側No. 44、49、50、L側No. 2、10、30

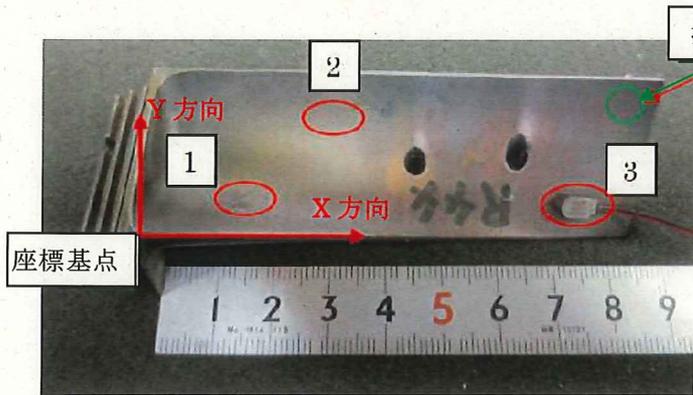
計測器：加速度ピックアップ

インパルスハンマ

FFTアナライザ

振動解析ソフト

計測位置：打撃点Aを固定し、計測点1～3を順次移動する。

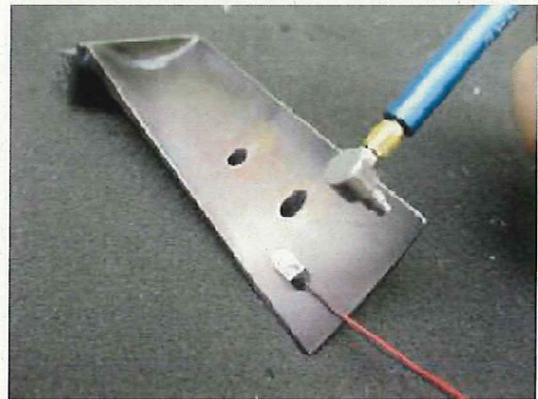


打撃点：A (固定)  
計測点：1、2、3 (移動)

計測点	座標 (mm)	
	X	Y
1	15	10
2	30	25
3	75	10

計測方法：各計測点の周波数応答関数（伝達関数）を計測収集し、固有振動数（ピーク値）を確認する。

ブレードの支持方法は、スポンジ上に置き、自由支持状態で計測する。



計測状態写真

・計測結果及び解析結果

計測結果と解析結果を「表-3」に示す。

計測結果と解析結果はおよそ10%程度の差が見られたが、概ね一致しており、固有値解析の妥当性が確認されたものとする。

表-3 計測結果と解析結果

振動モード	計測結果 (Hz) 数字はNo. を指す						計測平均 ① (Hz)	解析結果 ② (Hz)	差 ②/① (%)
	44	49	50	2	10	30			
1									89.0
2									92.7
3									90.1

また、解析した振動モード図（変形）を「図－3」に示す。



図－3 振動モード図（変形）

(4) ロータシャフトのハンマリング試験による固有振動数計測結果

・計測方法

計測対象：L側ロータシャフト

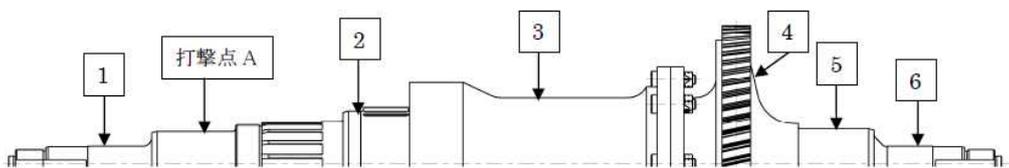
計測器：加速度ピックアップ

インパルスハンマ

F F Tアナライザ

振動解析ソフト

計測位置：打撃点Aを固定し、計測点1～6を順次移動する。



計測方法：各計測点の周波数応答関数（伝達関数）を計測収集し、固有振動数（ピーク値）を確認する。

ロータの支持方法は、スポンジ上に置き、自由支持状態で計測する。



計測状態写真

・計測結果及び解析結果

計測結果と解析結果を「表－4」に示す。

解析結果は、「図－4 ロータシャフト固有値解析モデル」に示すとおり、ハンマリング試験を行ったロータシャフトをモデル化して実施した。

計測結果と解析結果は概ね一致しており、固有値解析の妥当性が確認された。

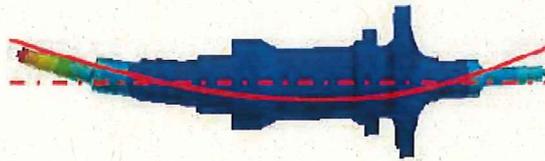
表－4 計測結果と解析結果

振動モード	計測結果① (Hz)	解析結果② (Hz)	差②/①(%)
1			97.7
2			96.0
3			95.7

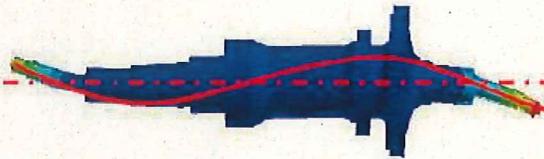


図－4 ロータシャフト固有値解析モデル

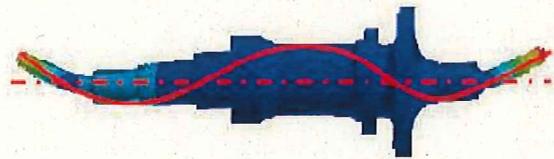
また、解析した振動モード図（変形）を「図－5」に示す。



振動モード1



振動モード2



振動モード3

図－5 振動モード図（変形）

## タービンプレードレーシングワイヤ孔加工に関する確認結果

タービンプレードレーシングワイヤ孔加工は、図-1に示す加工治具を用いて加工する。加工治具は、治具台座とドリルビットガイドが一体でボルト留めされるが、レーシングワイヤ孔の高さ方向へのずれが発生する可能性について、加工治具を構成するパーツの組立寸法を評価し、位置ずれの要因について調査を実施した。

孔位置がずれる可能性を調査した結果、以下の2つの要素により発生する可能性を確認した。

(1) 位置設定プレートは、治具ベース固定ボルトの緩み及びタービンプレードファツリ一部固定治具の調整代により最大 [REDACTED] mmの位置調整が可能であることを確認

- ・ 治具ベース固定ボルトの緩み： [REDACTED] mm
- ・ 位置設定プレート調整代： [REDACTED] mm
- ・ 合計： [REDACTED] mm

(2) 位置設定プレートとドリルガイド及びドリルとの寸法差により、最大 [REDACTED] mmの製作誤差が発生することを確認

- ・ 位置設定プレートとドリルガイド寸法差： [REDACTED] mm
- ・ ドリルガイドとドリル寸法差： [REDACTED] mm
- ・ 合計： [REDACTED] mm

(1)の固定ボルトが緩んでいた場合は、(2)製作誤差の最大値が加わることで最大 [REDACTED] mmのタービンプレードレーシングワイヤ孔高さの位置ずれが発生する可能性があることを確認した。

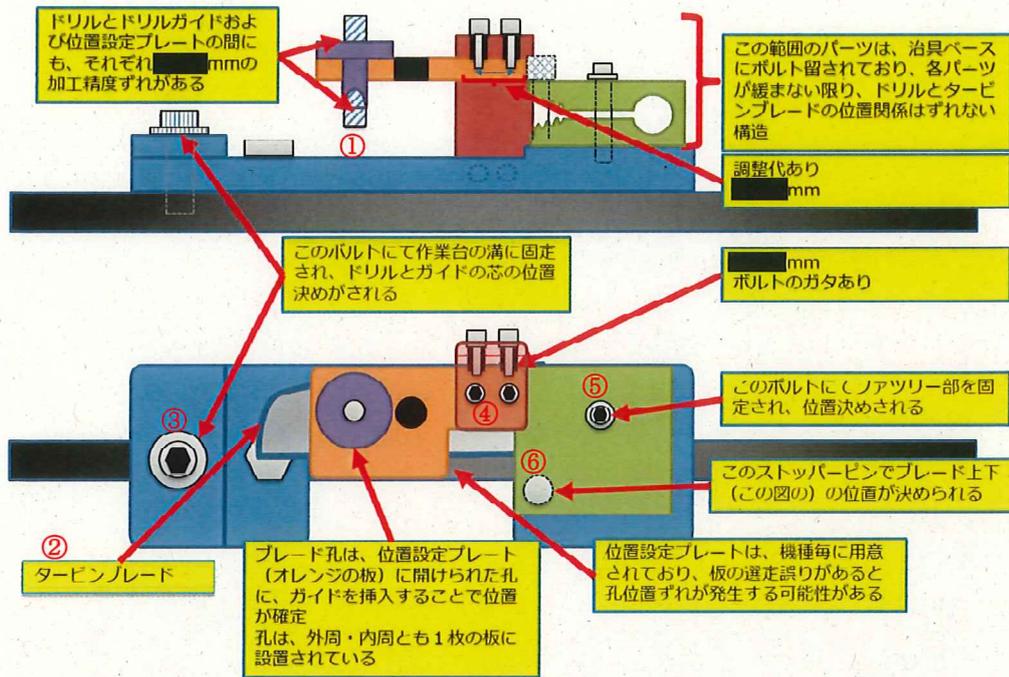
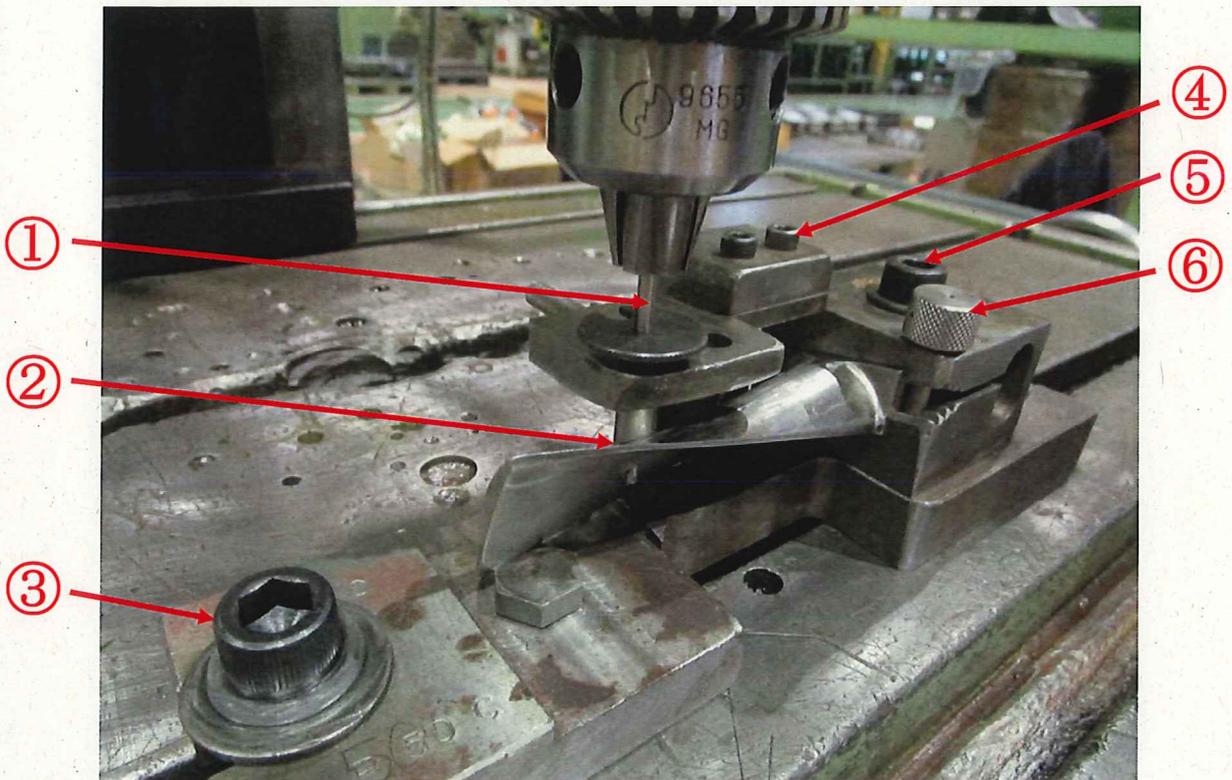


図-1 加工治具



参考 タービンブレードレーシングワイヤ孔加工状況 (再現)

タービンプレードファツリー部及びロータファツリー部 三次元計測結果

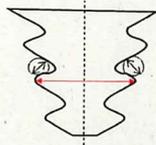
1. 計測対象

- ・任意性を考慮し、全タービンプレードファツリー部、ロータファツリー部の約10%とし、R側過給機及びL側過給機より各■枚ずつ選定し、三次元計測する。
- ・オーバピン計測<sup>※1</sup>で設計寸法どおりのブレードと設計寸法を逸脱したブレードより、任意のブレードを選定する。

※1 球面マイクロメータ又はピンゲージを用いてファツリー部の第2くびれ部を計測  
(表-1、2)

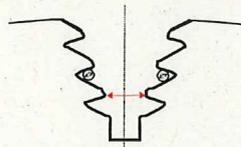
タービンプレードファツリー部：φ■■■■ mm (■■■■)

計測位置



ロータファツリー部：φ■■■■ mm (■■■■)

計測位置



2. 計測結果

タービンプレードファツリー部は、全体に厚みがあることが認められた。ロータファツリー部は、■翼中3翼について背面側に厚みのある部分が認められた。

なお、図中の寸法ゲージは、赤色+0.05mm ~ 緑色±0 ~ 濃青色-0.05mmを示す。

- 図-1 R側過給機のタービンプレードファツリー形状 三次元計測結果 参照
- 図-2 L側過給機のタービンプレードファツリー形状 三次元計測結果 参照
- 図-3 R側過給機のロータファツリー形状 三次元計測結果 参照
- 図-4 L側過給機のロータファツリー形状 三次元計測結果 参照

表-1 タービンブレードファツリ一部 (R側) 寸法検査記録

管理 No.	計測値	結果
翼 No. 1	9.695	良
翼 No. 2	調査中 (※)	
翼 No. 3	9.721	否
翼 No. 4	9.680	否
翼 No. 5	9.680	否
翼 No. 6	9.682	良
翼 No. 7	9.696	良
翼 No. 8	9.693	良
翼 No. 9	9.692	良
翼 No. 10	9.731	否
翼 No. 11	9.675	否
翼 No. 12	9.707	良
翼 No. 13	9.691	良
翼 No. 14	9.688	良
翼 No. 15	9.680	否
翼 No. 16	9.691	良
翼 No. 17	9.680	否
翼 No. 18	9.676	否
翼 No. 19	9.719	否
翼 No. 20	9.696	良

管理 No.	計測値	結果
翼 No. 21	9.683	良
翼 No. 22	9.694	良
翼 No. 23	9.681	良
翼 No. 24	9.680	否
翼 No. 25	9.676	否
翼 No. 26	9.729	否
翼 No. 27	9.687	良
翼 No. 28	9.698	良
翼 No. 29	9.704	良
翼 No. 30	9.668	否
翼 No. 31	9.666	否
翼 No. 32	9.718	否
翼 No. 33	9.691	良
翼 No. 34	9.718	否
翼 No. 35	9.675	否
翼 No. 36	9.685	良
翼 No. 37	9.695	良
翼 No. 38	9.689	良
翼 No. 39	9.689	良
翼 No. 40	9.690	良

管理 No.	計測値	結果
翼 No. 41	9.710	良
翼 No. 42	9.732	否
翼 No. 43	9.687	良
翼 No. 44	9.684	良
翼 No. 45	9.679	否
翼 No. 46	9.689	良
翼 No. 47	9.677	否
翼 No. 48	9.682	良
翼 No. 49	9.699	良
翼 No. 50	9.700	良
翼 No. 51	9.695	良
翼 No. 52	9.728	否
翼 No. 53	9.690	良
翼 No. 54	9.724	否
翼 No. 55	9.681	良
翼 No. 56	9.684	良
翼 No. 57	9.681	良
翼 No. 58	9.595	否
翼 No. 59	9.606	否
翼 No. 60	9.611	否
翼 No. 61	9.596	否

+0.021

-0.116

※：研究所にて詳細調査対象の翼であり、計測していない。

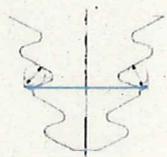
<p>判定基準</p> <p>φ <span style="background-color: black; color: black;">          </span> mm 球面マイクロメータを使用し、第2くびれ部が寸法 φ <span style="background-color: black; color: black;">          </span> mm ( <span style="background-color: black; color: black;">          </span> ) を満足している事。</p>	<p>計測位置</p> 
---	---

表-2 タービンブレードファツリ一部 (L側) 寸法検査記録

管理 No.	計測値	結果	管理 No.	計測値	結果	管理 No.	計測値	結果
翼 No. 1	9.696	良	翼 No. 21	9.686	良	翼 No. 41	9.703	良
翼 No. 2	9.690	良	翼 No. 22	9.683	良	翼 No. 42	9.693	良
翼 No. 3	9.681	良	翼 No. 23	9.689	良	翼 No. 43	9.700	良
翼 No. 4	9.684	良	翼 No. 24	9.672	否	翼 No. 44	9.704	良
翼 No. 5	9.669	否	翼 No. 25	9.644	否	翼 No. 45	9.677	否
翼 No. 6	9.685	良	翼 No. 26	9.680	否	翼 No. 46	9.680	否
翼 No. 7	9.678	否	翼 No. 27	9.685	良	翼 No. 47	9.706	良
翼 No. 8	9.685	良	翼 No. 28	9.674	否	翼 No. 48	9.723	否
翼 No. 9	9.693	良	翼 No. 29	9.693	良	翼 No. 49	9.695	良
翼 No. 10	9.693	良	翼 No. 30	9.680	否	翼 No. 50	9.701	良
翼 No. 11	9.695	良	翼 No. 31	9.681	良	翼 No. 51	9.701	良
翼 No. 12	9.670	否	翼 No. 32	9.667	否	翼 No. 52	9.687	良
翼 No. 13	9.685	良	翼 No. 33	9.693	良	翼 No. 53	9.670	否
翼 No. 14	9.680	否	翼 No. 34	9.691	良	翼 No. 54	9.704	良
翼 No. 15	9.704	良	翼 No. 35	9.696	良	翼 No. 55	9.675	否
翼 No. 16	9.693	良	翼 No. 36	9.683	良	翼 No. 56	9.680	否
翼 No. 17	9.680	否	翼 No. 37	9.678	否	翼 No. 57	9.687	良
翼 No. 18	9.691	良	翼 No. 38	9.693	良	翼 No. 58	9.725	否
翼 No. 19	9.690	良	翼 No. 39	9.682	良	翼 No. 59	9.691	良
翼 No. 20	9.672	否	翼 No. 40	9.672	否	翼 No. 60	9.694	良
						翼 No. 61	9.686	良

-0.067

+0.014

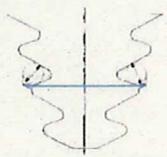
<p><b>判定基準</b></p> <p>φ [ ] mm 球面マイクロメータを使用し、第2くびれ部が寸法 φ [ ] mm ( [ ] ) を満足している事。</p>	<p><b>計測位置</b></p> 
---	--

図 - 1 R側過給機のタービンブレードファツリ形状 三次元計測結果 ( 1 / 1 )

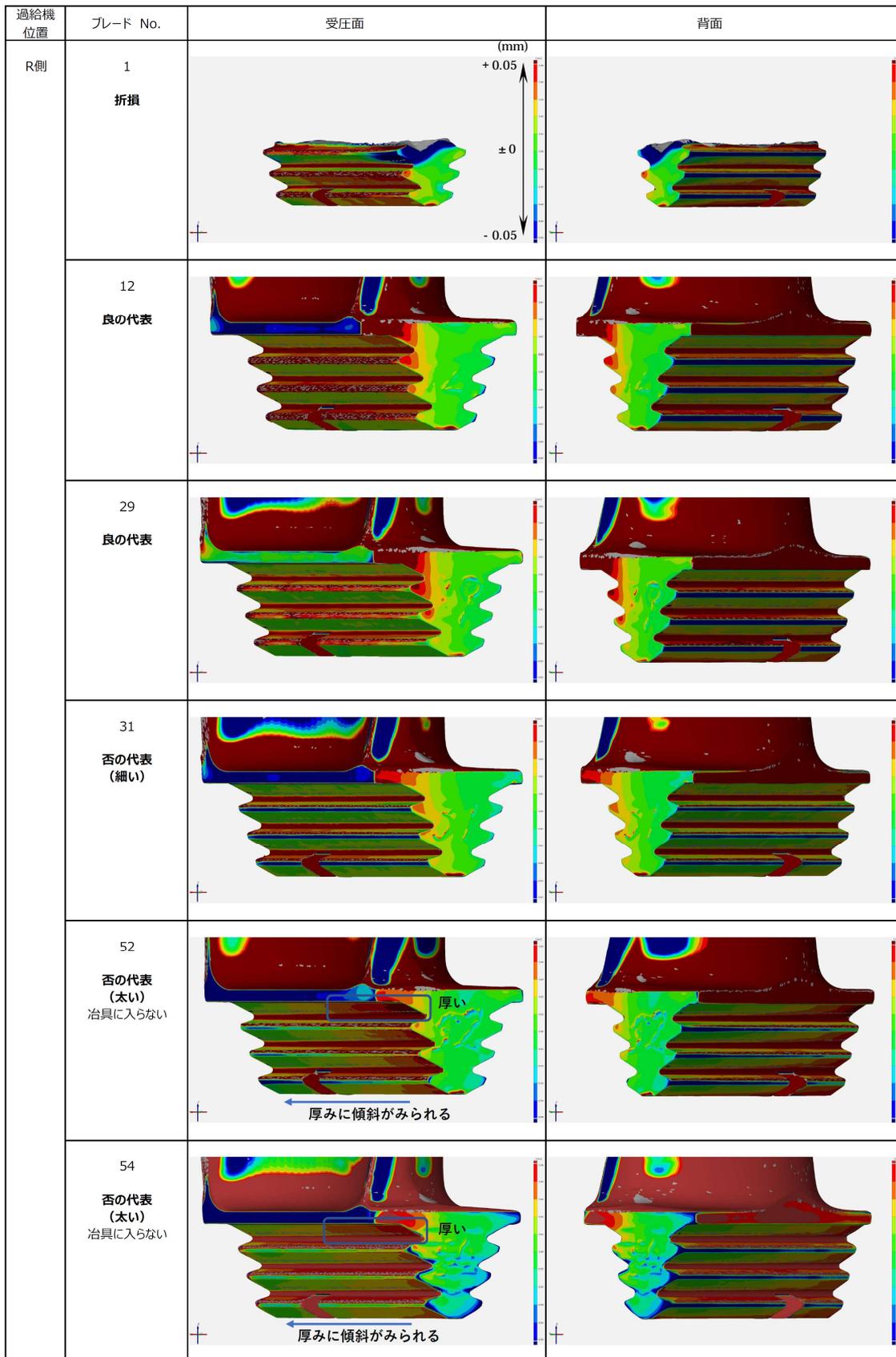


図 - 2 L側過給機のタービンブレードファツリ形状 三次元計測結果 ( 1 / 1 )

過給機位置	ブレード No.	受圧面	背面
L側	32 否の代表 (細い)		
	47 良の代表		
	48 否の代表 (太い) 治具に入らない		
	49 良の代表		
	54 良の代表		
	58 否の代表 (太い) 治具に入らない		

図 - 3 R側過給機のロータファツリ形状 三次元計測結果 (1 / 4)

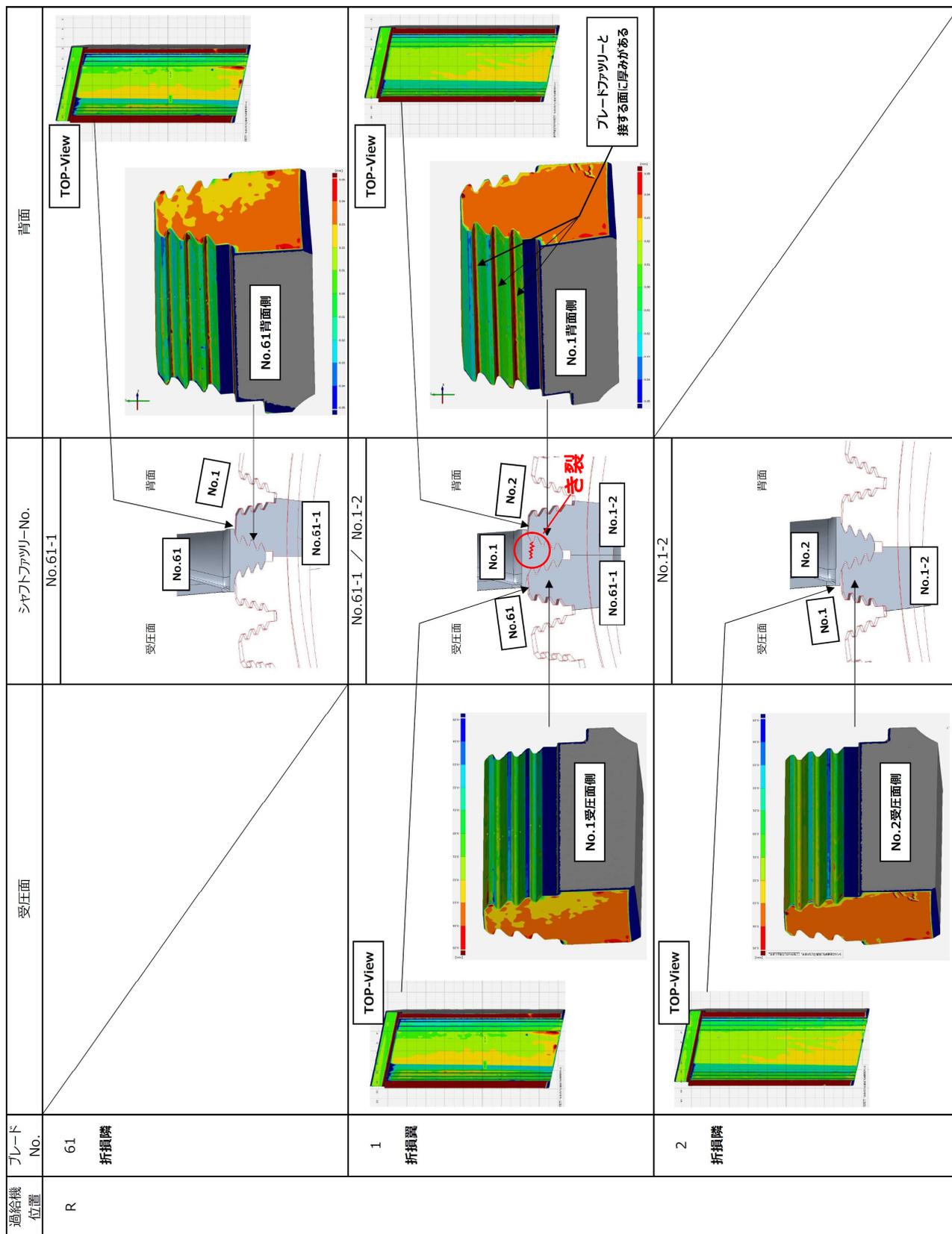


図 - 3 R側過給機のロータファツリ形状 三次元計測結果 (2 / 4)

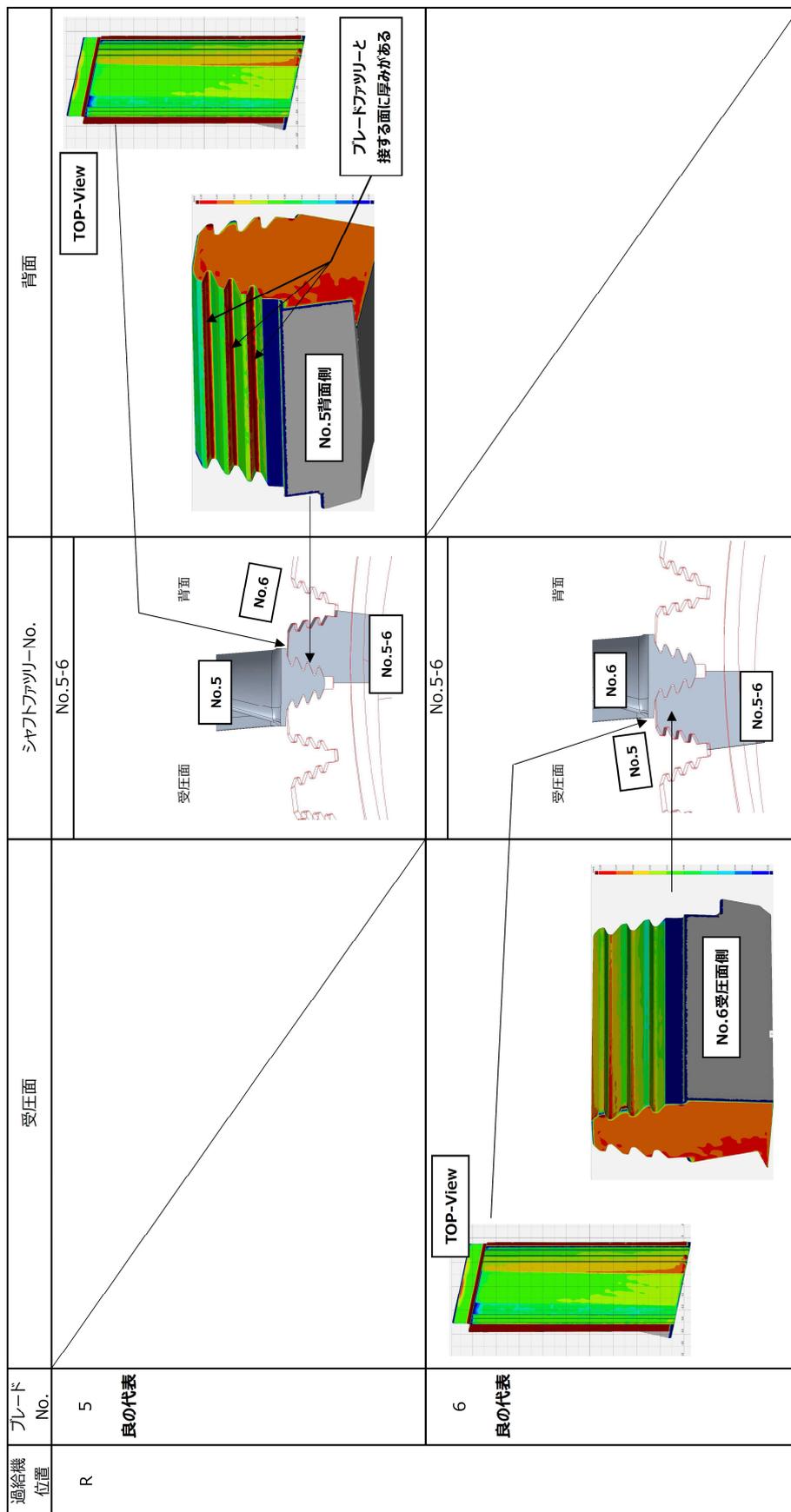


図 - 3 R側過給機のロータファツリ形状 三次元計測結果 ( 3 / 4 )

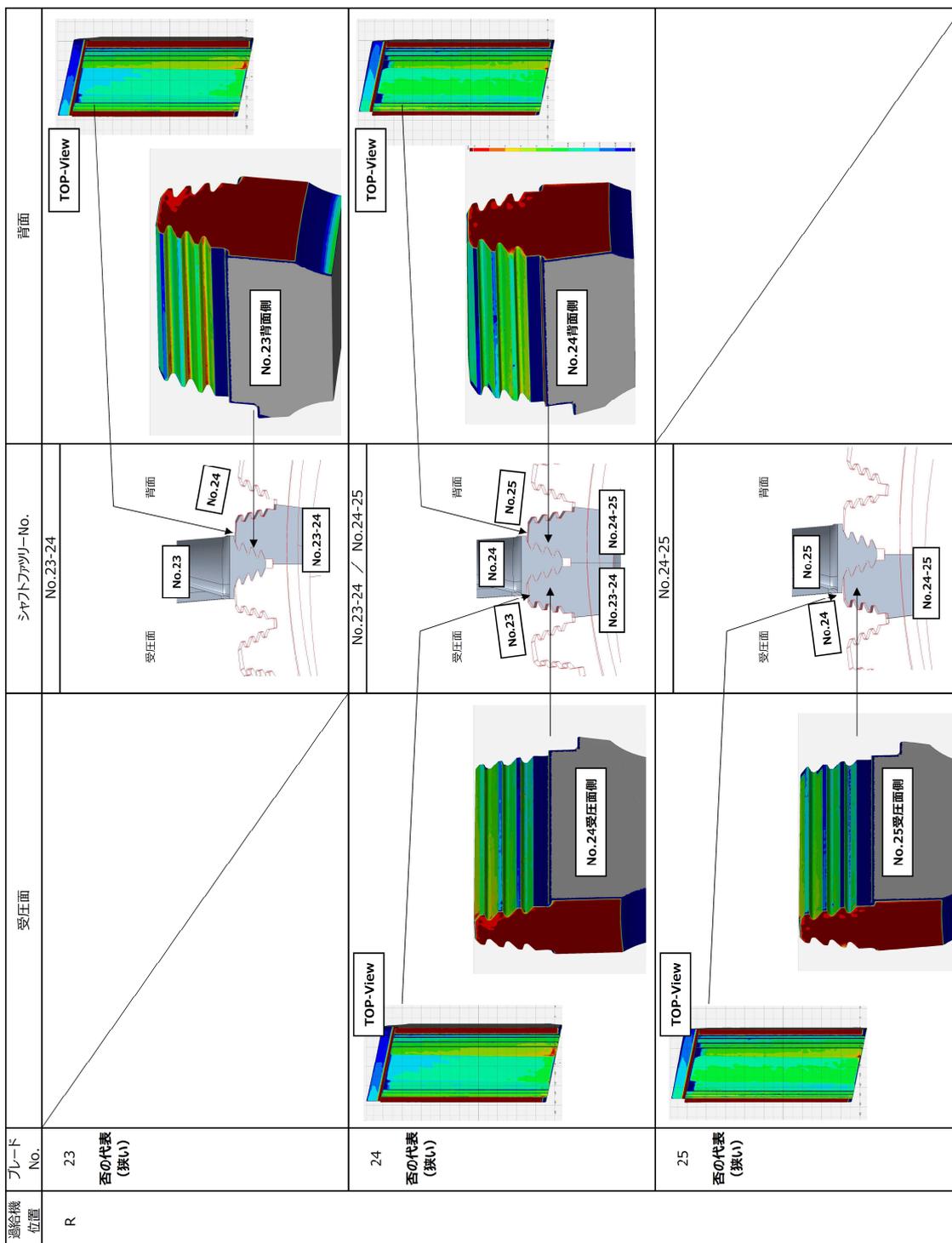


図 - 3 R側過給機のロータファツリ形状 三次元計測結果 ( 4 / 4 )

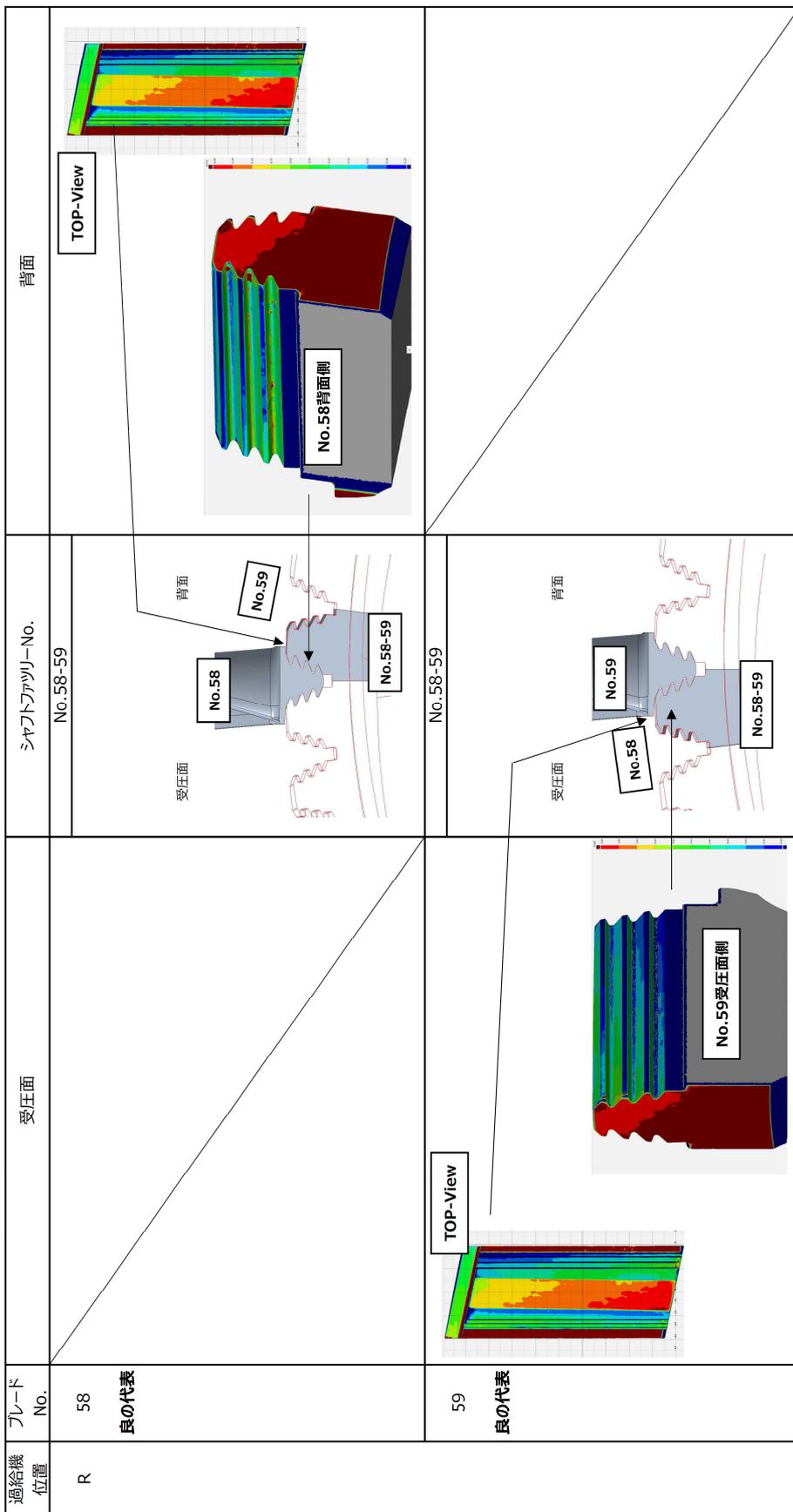


図 - 4 L側過給機のロータファツリ形状 三次元計測結果 (1 / 4)

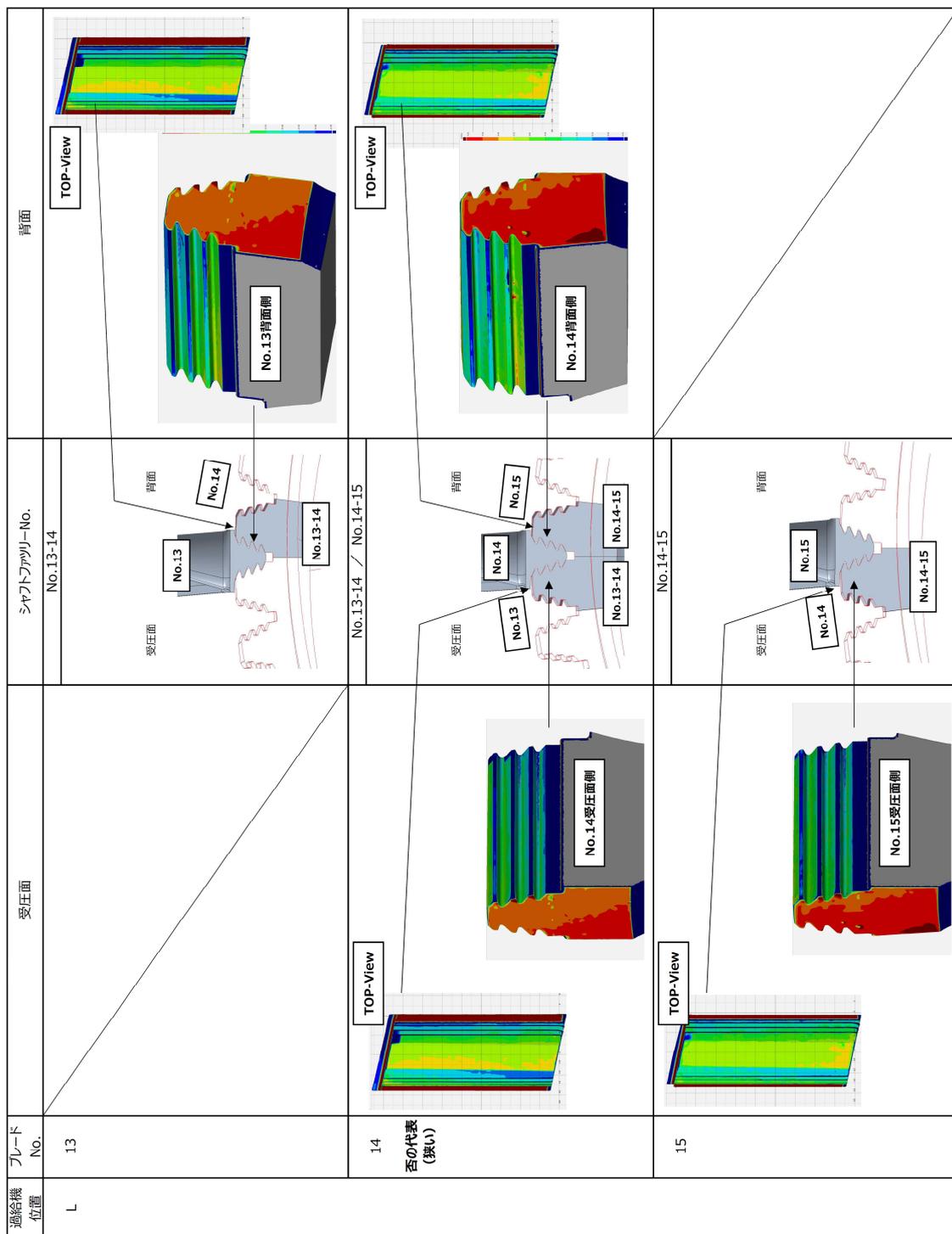


図 - 4 L側過給機のロータファツリ形状 三次元計測結果 (2 / 4)

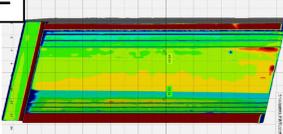
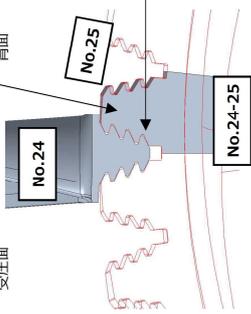
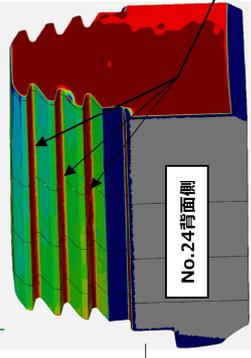
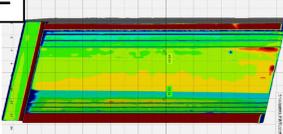
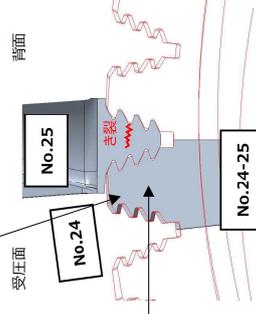
過給機位置	ブレードNo.	受圧面	シャフトファツリNo.	背面
L	24 き裂隣 舌の代表 (狭い)		No.24-25 	 <p>フレッドファツリと接する面に厚みがある</p>
L	25 き裂異			No.24-25 

図 - 4 L側過給機のロータファツリ形状 三次元計測結果 (3 / 4)

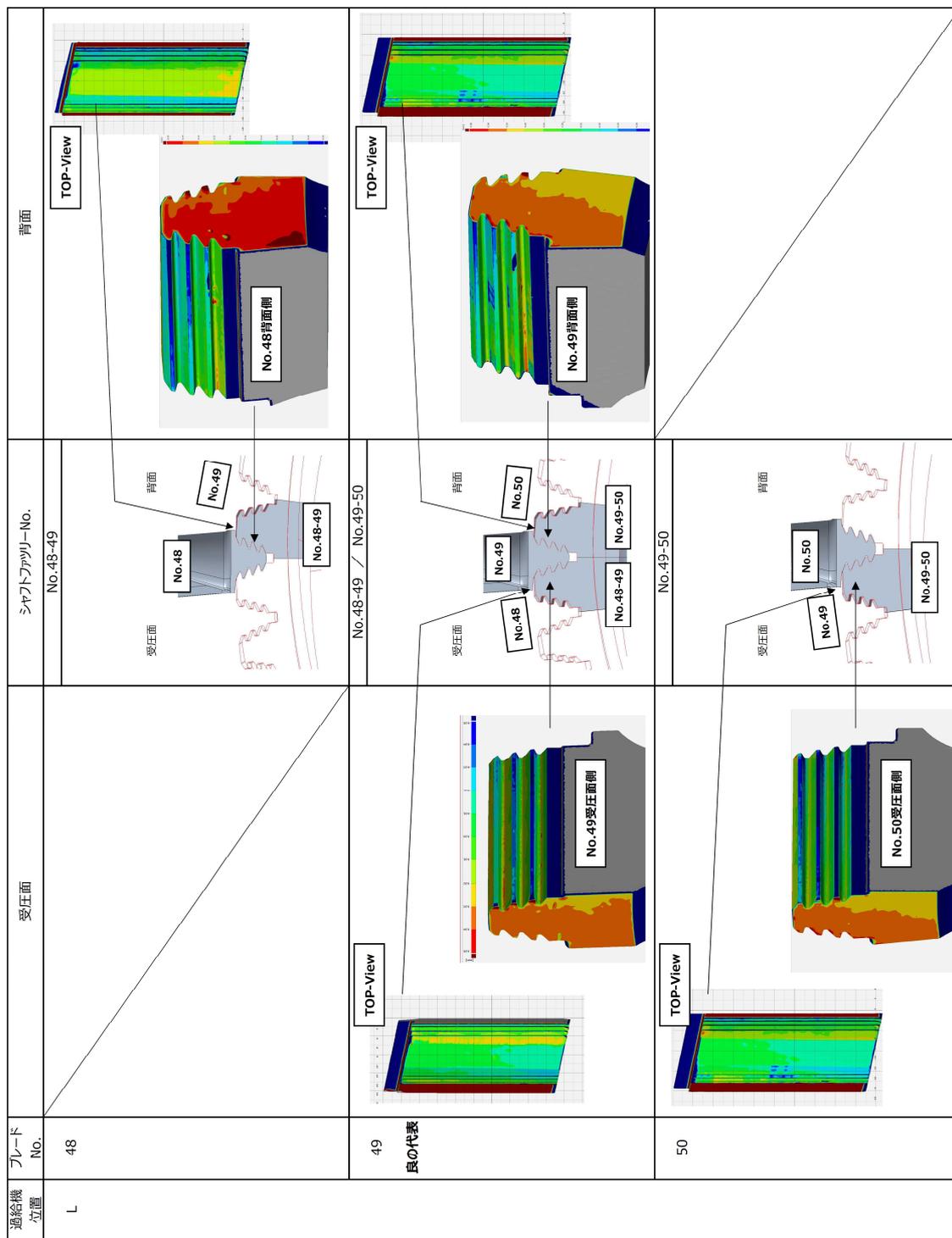
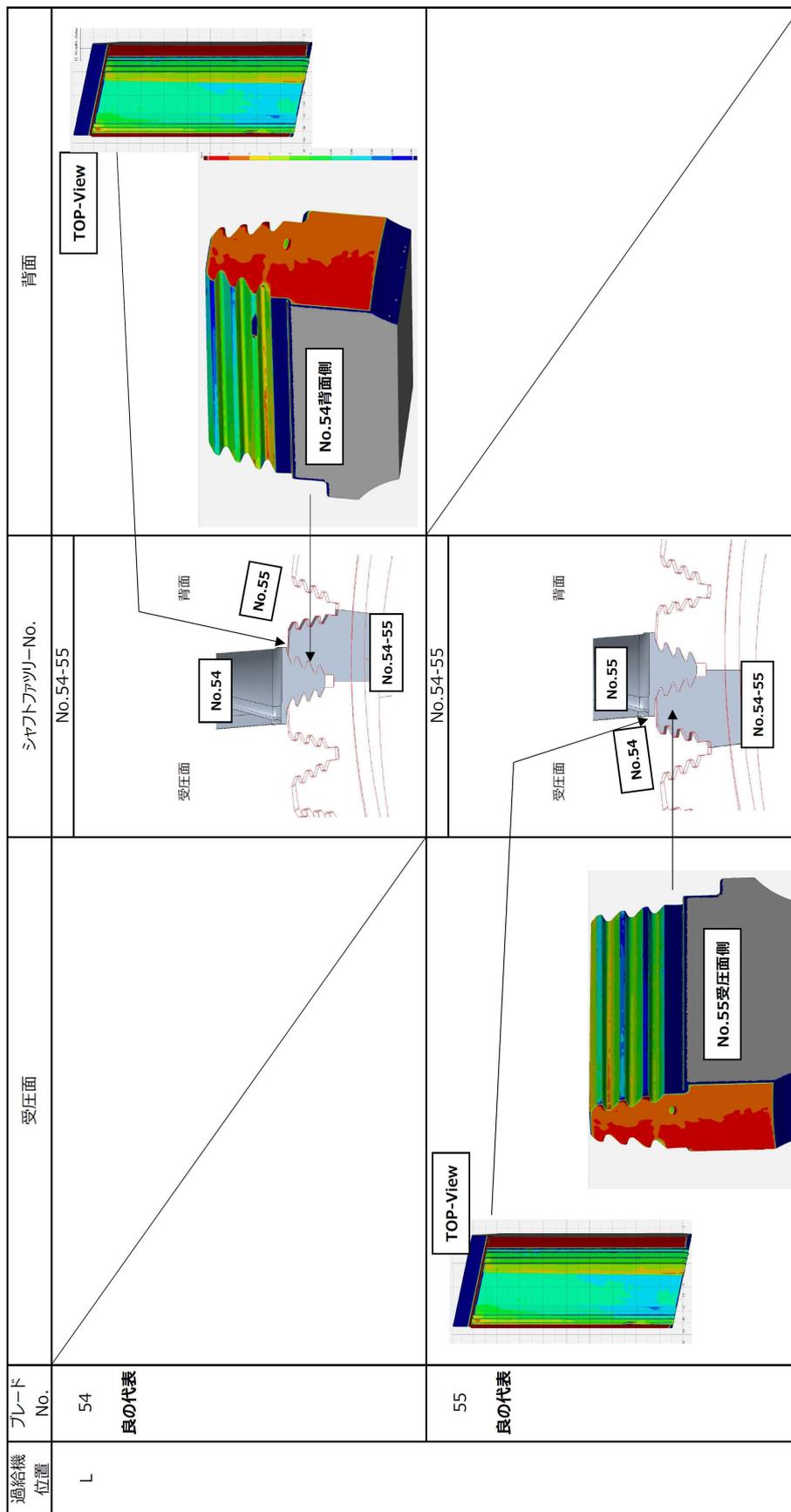


図 - 4 L側過給機のロータファツリ形状 三次元計測結果 (4 / 4)



タービンプレードの疲労破壊に関する考察

点検調査にて確認されたレーシングワイヤ孔高さ設計値逸脱及びファツリー部寸法の設計値逸脱が、タービンプレードファツリー部に及ぼす影響について、各状況を踏まえた応力解析を実施した。

(1) 解析モデル

- ・過給機型式：████████
  - ・解析ソフトウェア：ANSYS Mechanical Ver.18.0
- 解析モデルの詳細を以下に示す。

(2) 解析条件

- ・材料定義
- 解析で使用した材料物性値を表-1に示す。

表-1 解析モデルの物性値

品名	材質	密度 (Kg/m <sup>3</sup> )	ヤング率 (GPa)	線膨張係数 (1/°C)	出典
タービンプレード	████████	████████	████████	████████	※1
ロータシャフト	████████	████████	████████	████████	※2
レーシングワイヤ	████████	████████	████████	████████	※1

(出典) ※1 Total Materia Special Metal Corporation

※2 日本機械学会 金属材料の弾性係数

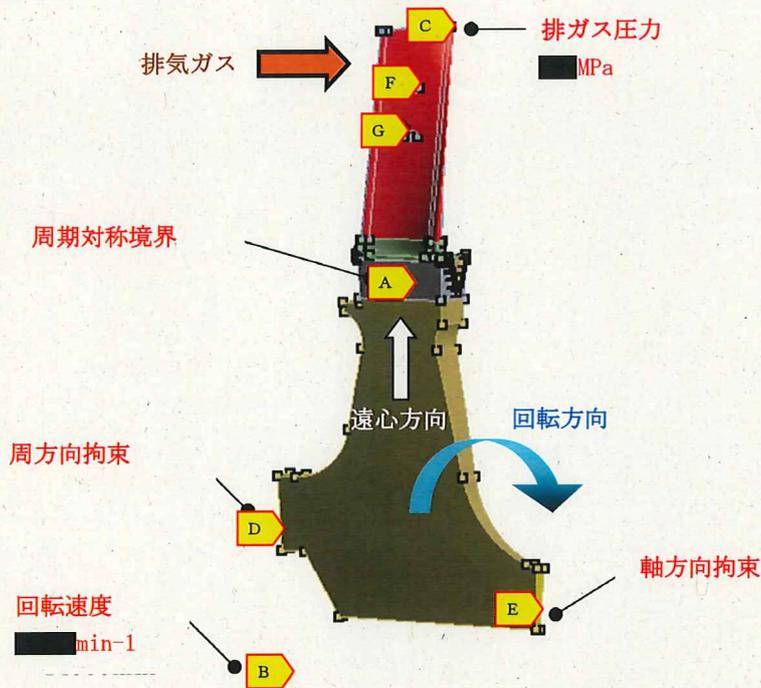
(3) 解析の境界条件

解析の境界条件は以下のとおり。

- A 周期対称境界 : ロータシャフトの圧力面側と負圧面側を周期対称境界とする
- B 回転速度 : 工場試験データによる
- C 排ガス圧力 : 工場試験データによるピーク圧力
- D 周方向拘束 : ロータシャフトの後縁側を周方向拘束とする
- E 軸方向拘束 : ロータシャフトの前縁側を周方向拘束とする
- F 外周側レーシングワイヤ遠心力 :  $\blacksquare$  N (1翼分のワイヤ質量 $\times$ 半径 $\times$ 角速度 $^2$ より算出)  
レーシングワイヤ半径  $\blacksquare$  mm
- G 内周側レーシングワイヤ遠心力 :  $\blacksquare$  N (1翼分のワイヤ質量 $\times$ 半径 $\times$ 角速度 $^2$ より算出)  
レーシングワイヤ半径  $\blacksquare$  mm

解析の温度条件は過給機運転時の  $\blacksquare$  °C による。

排ガス圧力 : 機関運転時の排気脈動を考慮し、ピーク圧力である  $\blacksquare$  MPa を解析条件とした。



レーシングワイヤ角度

抜き出したレーシングワイヤに  $10^\circ$  の屈曲が確認 (別紙-1 参照) されたため、レーシングワイヤ角度を  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$  に変化させると、レーシングワイヤの作用角度 (図の  $\theta$ ) が変化することから、タービンブレードへの応力の影響を評価する。

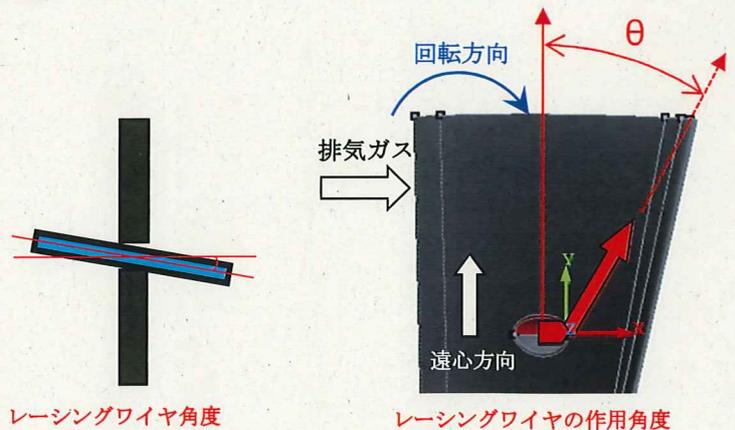




表-2 過給機使用条件

負荷率	%	0	25	50	75	100	110
過給機回転回数	rpm						
給気圧力	kg/cm <sup>2</sup>						
排気ガス圧力 (過給機入口)	kg/cm <sup>2</sup>						
排気ガス脈動ピーク圧力 (過給機入口)	kg/cm <sup>2</sup>						
タービン入口排気ガス温度	°C						
タービン出口排気ガス温度	°C						
タービンブレード金属温度	°C						

100%負荷における最大値

機関 過給機入口排気ガス圧力実測データ(抜粋)  
100%負荷率運転時

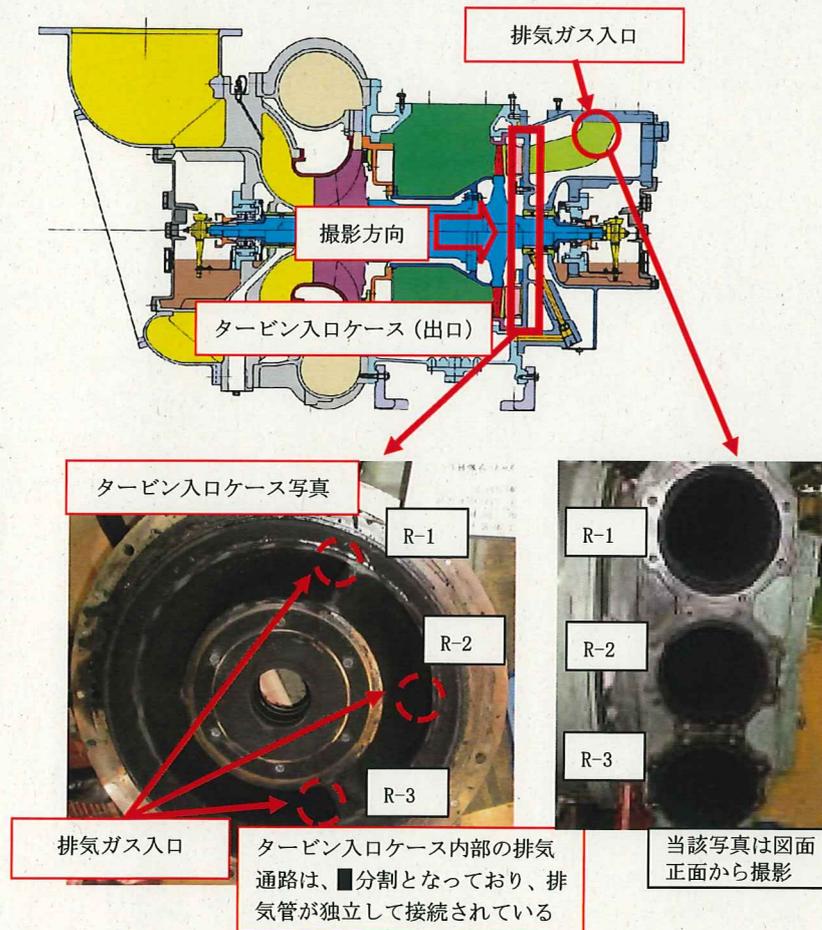
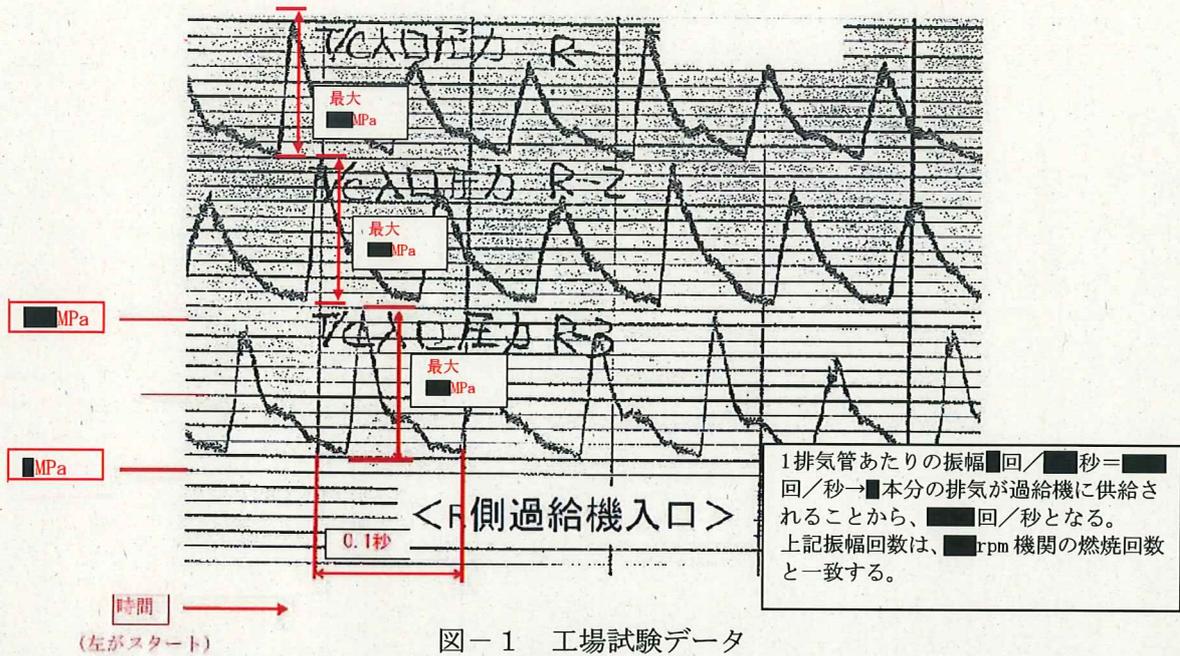


図-2 過給機排気ガス流路の解説

(4) 解析結果

表-3にパラメータを変化させて解析した結果を示す。

平均応力は、排ガス圧力がある場合とない場合の平均、応力振幅は、排ガス圧力がある場合とない場合の応力差として計算した。この結果より、レーシングワイヤ角度が傾いた場合に、タービンプレードに対するレーシングワイヤの作用角が変化し、応力振幅が大きくなることがわかった。

表-3 解析結果一覧表 (単位: MPa)

ファツリー 隙間 (mm)	解析 Case-No	ワイヤ角 (°)	背面応力 (MPa)	平均応力 (MPa) ※2	応力振幅 (MPa) ※2	評価						
通常	—	作用無	■■■■■	■■■■■	■■■■■	—						
	Case-1	0				○						
	Case-2	5				○						
	Case-3	10				○						
背面のみ 0.05 狭い	—	作用無				■■■■■	■■■■■	■■■■■	—			
	Case-4	0							○			
	Case-5	5							○			
	Case-6	10							×			
背面のみ 0.10 狭い	—	作用無							■■■■■	■■■■■	■■■■■	—
	Case-7	0										○
	Case-8	5										○
	Case-9	10										×

※1 排ガス圧力は■■■■■MPa

※2 平均応力は隙間状態が「通常」、「背面のみ0.05狭い」、「背面のみ0.10狭い」各ケースの応力とワイヤ作用無状態(表中①を付した)との平均値、応力振幅はそれぞれの差とした。

(5) 高サイクル疲労評価

表-3の結果について、修正グッドマン線図にプロットした結果を図-3に示す。

タービンプレードの背面側ファツリー部に発生する平均応力は排ガス圧力とレーシングワイヤに作用角度がついた場合が重なった場合に、減少する傾向にあるが、その一方で応力振幅が増加する。また隙間が減少した場合には、排ガス圧力がかからない場合に背面側ファツリー部の応力を高める作用がある。これらの要因が重なることにより、条件によっては背面側ファツリー部応力が疲労限度を超える可能性があることを確認した。

現品の3D形状計測結果より、R側No.5ブレードの背面側ファツリー部はクリアランスが0.05mm狭くなっている状況が確認されている。またL側No.25ブレード部のレーシングワイヤには、約10度の曲がりが見られた。この曲がりによりブレードに10度の角度でワイヤ遠心力が作用する可能性が考えられる。これらの現品調査結果を反映した解析はcase-6となるが、case-6は、図-3の修正グッドマン線図において、疲労限度線をわずかに超えるところに位置することがわかった。

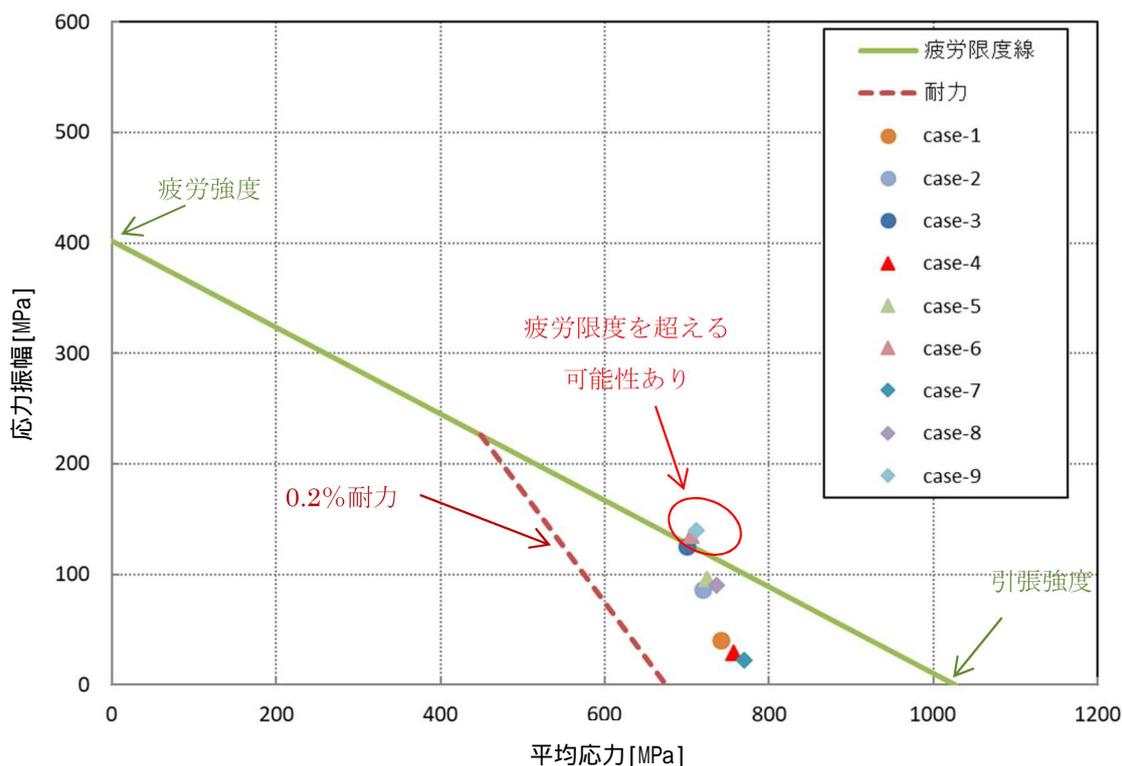


図 - 3 修正グッドマン線図

( 6 ) 解析結果まとめ

レーシングワイヤの遠心力荷重がタービンブレードに対し傾いて作用した条件及びファツリー部クリアランスが減少した条件を仮定し、静的応力解析を行った結果、レーシングワイヤ作用方向に角度がつくほど背面側ファツリー部の応力振幅が大きくなり、2つの要素が重なった場合には、疲労限度を超える可能性があることがわかった。ファツリー部の隙間は、現品の3Dスキャンによる寸法計測結果より、約0.05mm減少していることが確認されており、またレーシングワイヤも現品調査の結果、約10°程度曲がりが見られる。この2つの条件が重なった場合にて解析を行ったところ、疲労限度をわずかに超える結果となった。従って、このことはタービンブレードがファツリー部より疲労破壊に至ったメカニズムをおおよそ再現しているものとする。

## (7) タービンプレードの材料データ

タービンプレードの材料データは、材料メーカーカタログ値、損傷した過給機のタービンプレードからの実態切り出し試験片、および文献を引用し応力解析条件を設定した。

## ・温度条件

タービンプレード材料の[ ]の実使用温度(約[ ]°C)条件(図-4)における引張強度及び疲労限度データがないことから、メーカーカタログ値を利用し温度条件[ ]°Cでの評価をしている。

## ・疲労限度

タービンプレードの材料である[ ]の実使用温度(約[ ]°C)条件における引張強度及び疲労限度データがないことから、メーカーカタログ値より[ ]°Cにおける引張強度:[ ]MPa、疲労限度:[ ]MPa、耐力:[ ]MPaにて評価をしている。

実使用温度(約[ ]°C)と評価に使用した温度([ ]°C)に差があるが、損傷した過給機のタービンプレードからの実態切り出し試験片\*により、[ ]°Cでの引張強度、耐力(表-4)などがメーカーカタログ値とほぼ一致することを確認しており、[ ]°Cのデータを使用した評価は保守的な評価となると考えている。

また、他文献「Aerospace Structural Metals Handbook」の材料データにて熱処理条件は異なるが、温度条件による疲労限度に大きな差異は確認されなかった。

※ 試験片数：各3サンプル

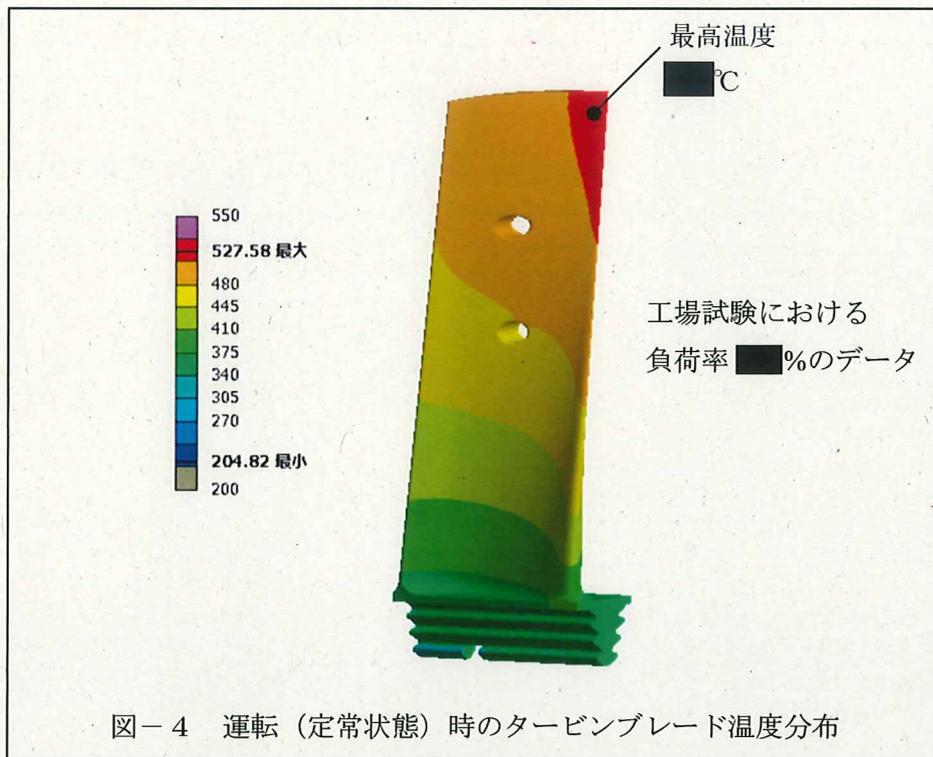
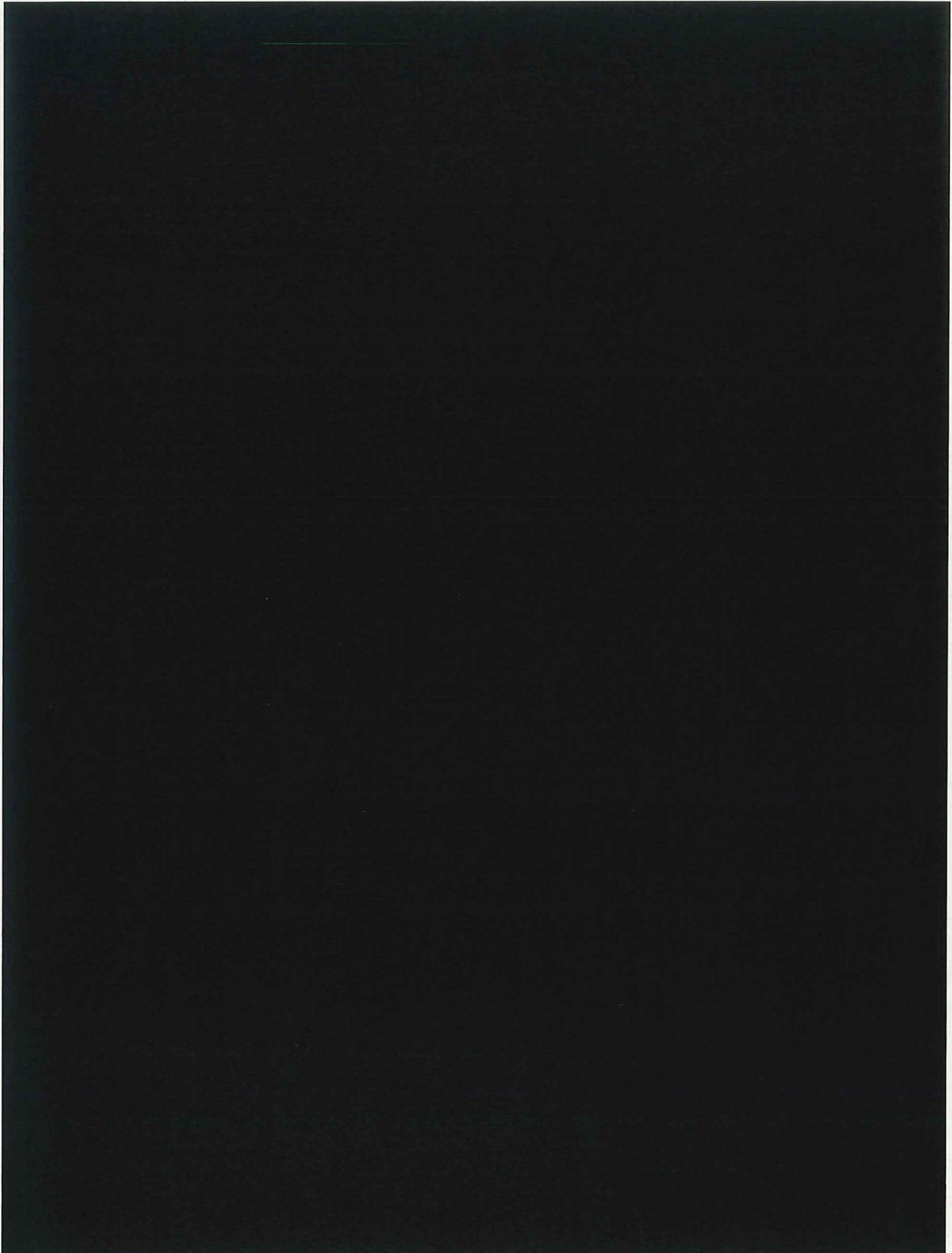
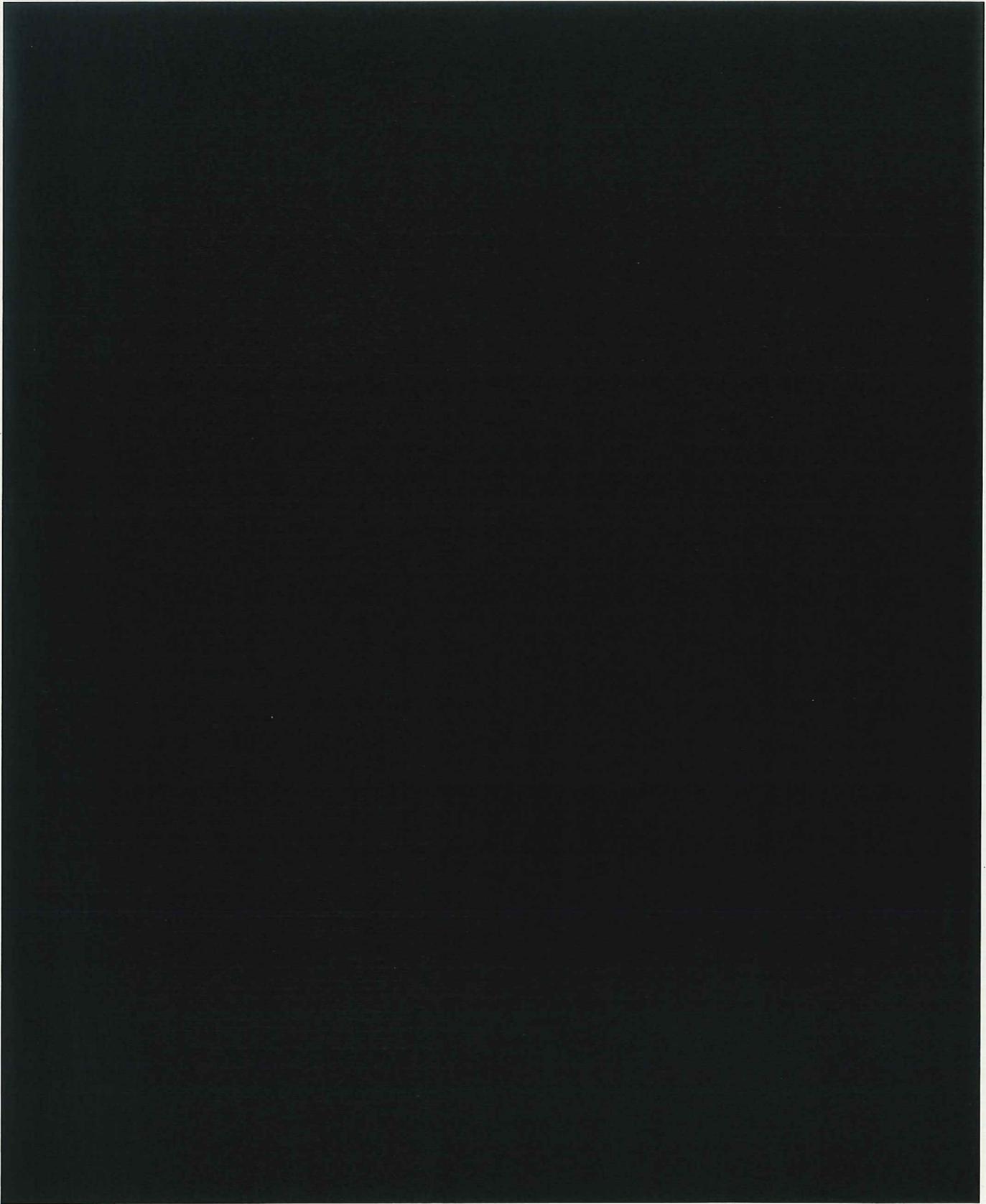
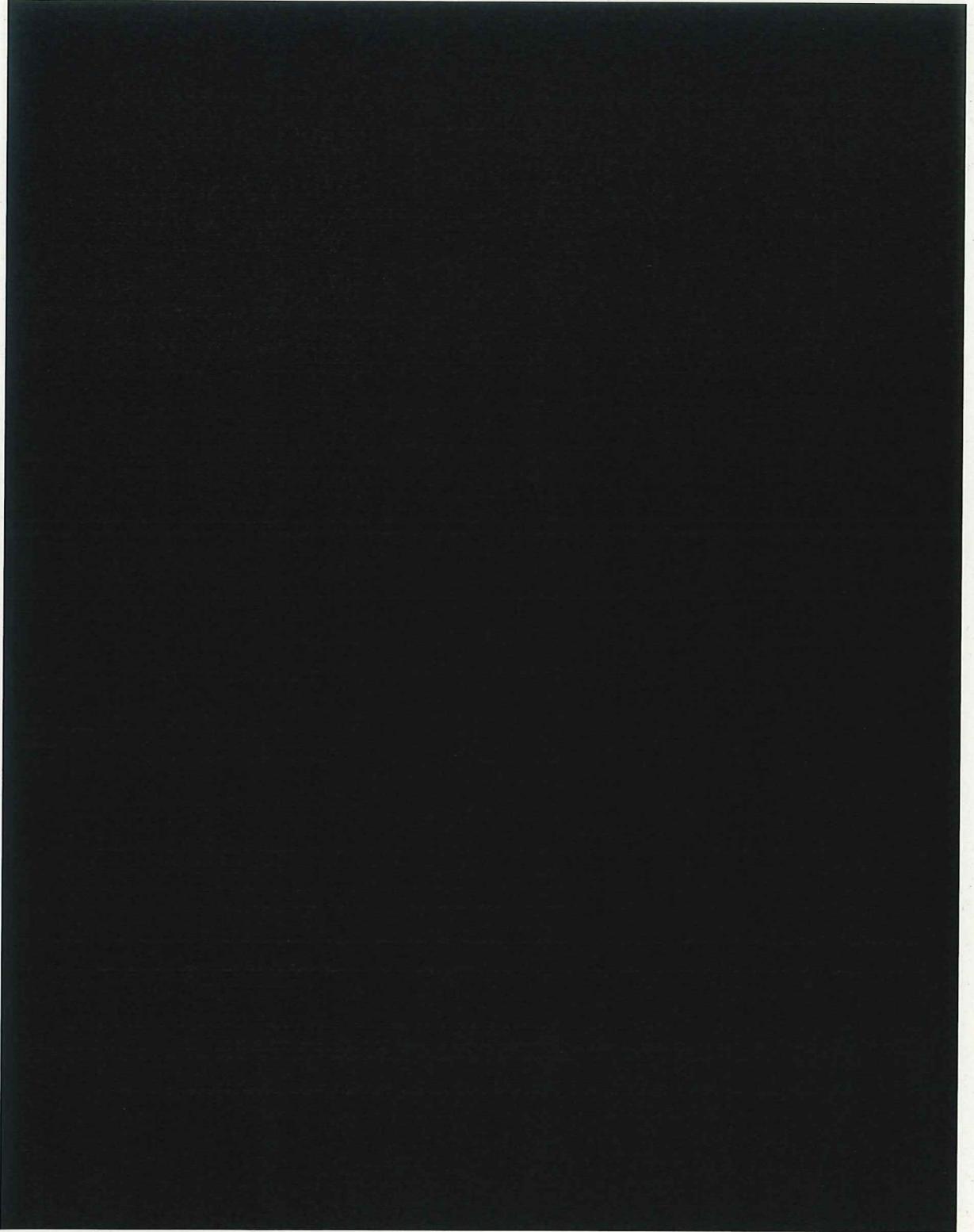


表-4 材料特性比較表

	0.2%耐力	引張強度	伸び
	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)
実体切り出し試験片新品 (■°C)	■	■	■
実体切り出し試験片 R 側 (■°C)	■	■	■
カタログ値 (■°C)	■	■	■

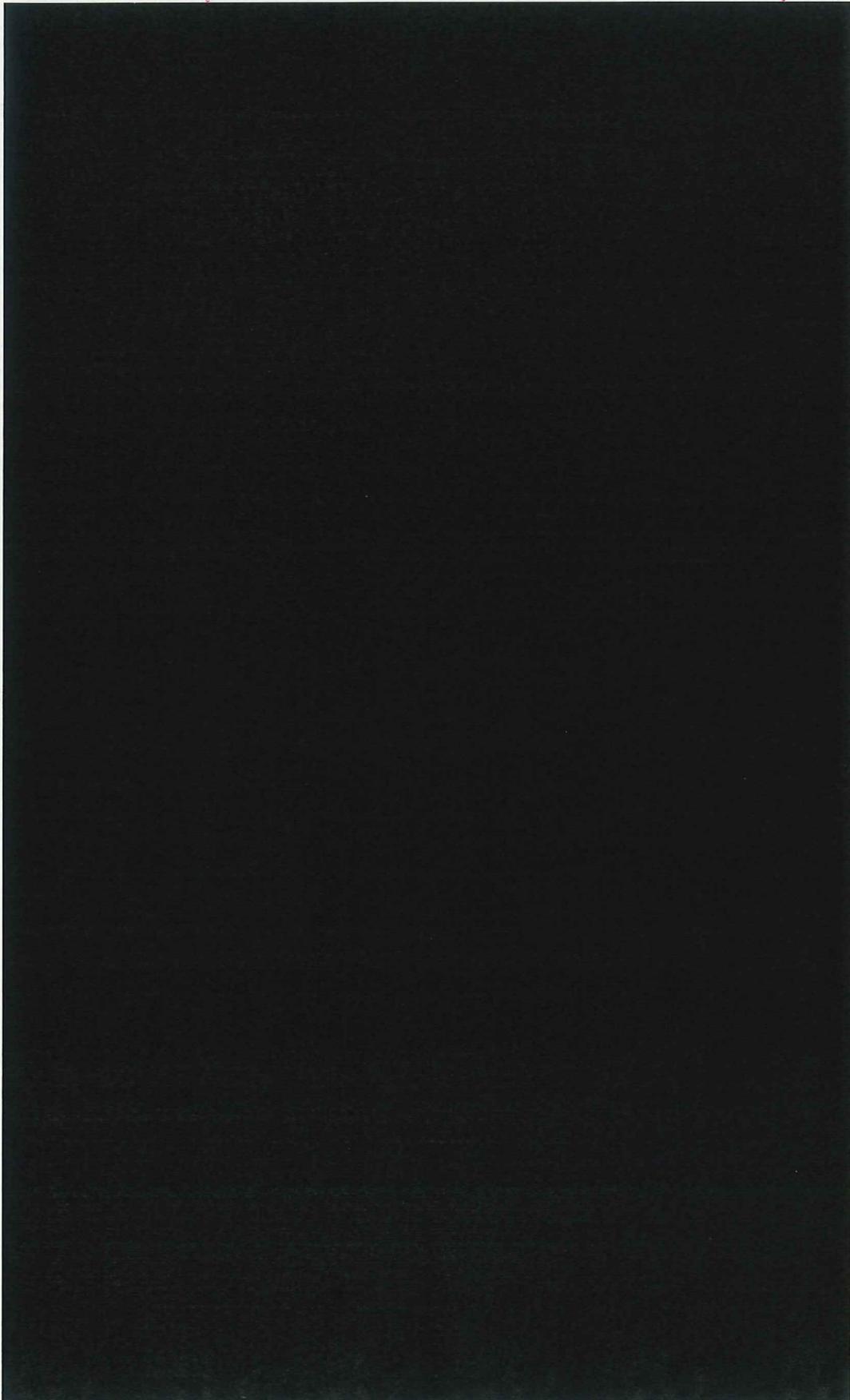






○タービンブレードの材料の温度条件による応力

温度条件による引張強度及び疲労限度に大きな差異は確認されなかった。



レーシングワイヤ孔高さずれによるタービブレードファツリ部への影響について

レーシングワイヤ孔高さ測定にて、き裂が確認されたL側タービブレードNo. 25で隣接するタービブレードとの高低差が最大約1.6mm確認されている。(添付資料-9) また、抜き出したレーシングワイヤに屈曲が確認されており、図1にて角度が約10°あることが確認された。

(1) 幾何学的形状での値

隣接するブレードの孔位置ずれを直線に結んで2次元で作図した場合に、約1.6mmのずれは約5°のレーシングワイヤ角度に相当し、10°と仮定した場合は、3mm程度のずれがないと発生しない。

レーシングワイヤ孔高さがずれていることで、タービブレードをロータ側に挿入する際にレーシングワイヤを通常の湾曲角度以上に曲げながら挿入させる必要があることから、挿入作業時に更にレーシングワイヤが局部的に屈曲した可能性がある。

(2) 応力解析の実施

確認されたレーシングワイヤ角度10°のほか、0°、5°の角度の影響によるタービブレードへ付加される遠心応力をインプットし、背面側及び、受圧面側へ各3ケースの角度をインプットした応力解析を実施したところ、背面側へ倒れる方向に作用した時に応力振幅として疲労限度を超える結果となった。(添付資料-10)

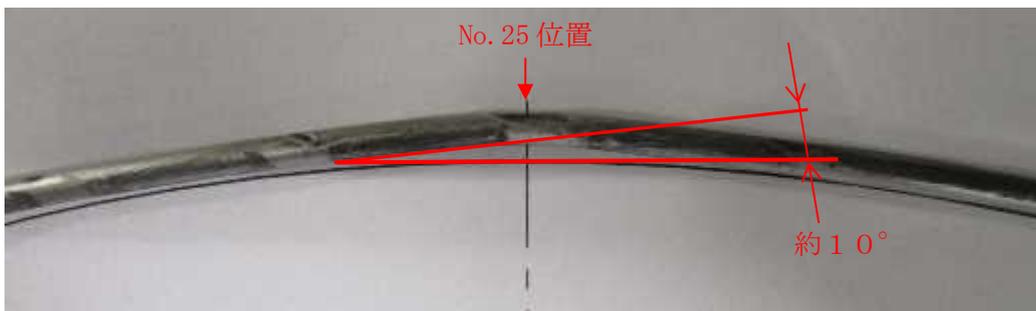


図1 L側レーシングワイヤ屈曲

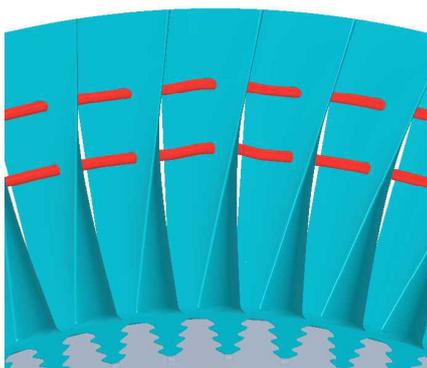


図2 レーシングワイヤ屈曲イメージ

隣接するタービブレードとのレーシングワイヤ孔高さのずれが大きいほど、レーシングワイヤ角度が大きくなる。

### 過給機軸固着に伴う影響調査結果

R側過給機軸固着に伴い、当該D/Gの排気側・給気側それぞれに、損傷部品の破片が流出した可能性が高いことから、ディーゼル機関の点検を実施した。

#### (1) 点検内容及び判定基準

- ・ R側全9気筒の開放を実施し、過給機の損傷部品がないこと
- ・ L側代表2気筒の開放を実施し、過給機の損傷部品がないこと
- ・ R側及びL側排気管全数に対し内部点検（目視点検）及び伸縮継手の内外面点検を実施し、異常がないこと
- ・ R側空気冷却器の開放点検を実施し、異常がないこと

#### (2) 点検結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	R側シリンダ	異常なし	2018/11/16～ 11/19	—
2	L側シリンダ	異常なし	2018/11/16～ 11/19	—
3	排気管・伸縮継手	異常なし	2018/11/28	—
4	R側空気冷却器	異常なし※ <sup>1</sup>	2018/11/27	—

※ 1 R側空気冷却器を開放した結果、空気冷却器に異常は確認されなかったが、R側過給機損傷部から発生したと考えられる金属片の混入を確認。

#### R側シリンダ



シリンダヘッド取外 (No. 10)



ライナー内面確認 (No. 10)

L側シリンダ



シリンダヘッド取外 (No. 1)



ライナー内面確認 (No. 1)

排気管・伸縮継手



L側排気管・伸縮継手



L側排気管 (内部)



R側排気管・伸縮継手



R側排気管 (内部)

空気冷却器



拡大  
写真



内部に金属片を確認

R側空気冷却器

保守管理に関する調査結果

保全プログラムによる点検

(1) 点検改造履歴

当該D/Gの点検改造履歴を以下に示す。

表-1 点検改造履歴

イベント	時期	備考
過給機製造	1983年4月	
当発電所2号機不具合の水平展開工事 <sup>※1</sup> 実施	1994年11月	当発電所2号機不具合 <sup>※2</sup> 1991年10月発生
事象発生	2018年9月6日	必要な機能を有していないと判断した日時

※1 レーシングワイヤ孔表面をドリル加工後、リーマ通しを行い仕上げ（孔径をφ $\blacksquare$ mm→φ $\blacksquare$ mmに変更）、また、レーシングワイヤ止端部の形状と位置の変更を実施。

※2 レーシングワイヤ孔を電解加工にて実施しており孔表面にピット欠陥が存在し疲労強度が低下していたこと、レーシングワイヤの制振不足により、タービンブレード1枚が上段レーシングワイヤ孔部より上側が欠損していた。

当発電所2号機水平展開工事実施号機

不具合が確認された同型の過給機の内、当発電所2号機のタービンブレード製作時期より古いもの及び当発電所2号機と同様の電解加工による孔加工を行った過給機を対象に水平展開を実施

表-2 水平展開工事実施号機

発電所名	号機	対象	備考
福島第二原子力発電所	3号機	(A)、(B)、(HPCS)	ブレード再利用
	4号機	(A)、(B)、(HPCS)	ブレード再利用
柏崎刈羽原子力発電所	1号機	(A)、(B)、(HPCS)	ブレード再利用
	2号機	(B)	全数取替
	3号機	(A)、(B)	ブレード再利用
	5号機	(A)、(B)	全数取替

当発電所2号機(A)は不具合発生号機であり、一部ブレードを再利用、4号機は過給機製作時に水平展開工事実施済み

( 2 ) 過給機点検

- ・ 本格点検 ( 分解点検 ) : 5 サイクル毎  
外観目視点検及びタービンプレード翼部の非破壊検査 ( P T )  
ベアリング交換  
インデューサ、インペラの寸法検査  
オイルポンプ芯振れ計測  
インデューサ、インペラ、ディフューザ、ノズルリング非破壊検査 ( P T )
- ・ 簡易点検 ( 潤滑油交換 ) : 1 サイクル毎  
潤滑油交換を実施

表 - 3 当該 D / G 保守状況調査記録

定期検査	定期検査期間	点検内容
第 7 回	1994/9/18 ~ 1994/12/27	本格点検 ( 当発電所 2 号機 水平展開工事 )
第 9 回	1997/6/28 ~ 1997/9/11	本格点検
第 1 4 回	2005/6/14 ~ 2006/5/30	本格点検

## 過去の類似事象に関する調査結果

非常用ディーゼル発電機過給機のタービンブレード折損に関する過去の類似事象について、以下の方法により調査した。調査結果を表－1に示す。本事象のようにタービンブレードアッリ一部に疲労破壊が生じた事象は確認されなかった。

## 調査方法

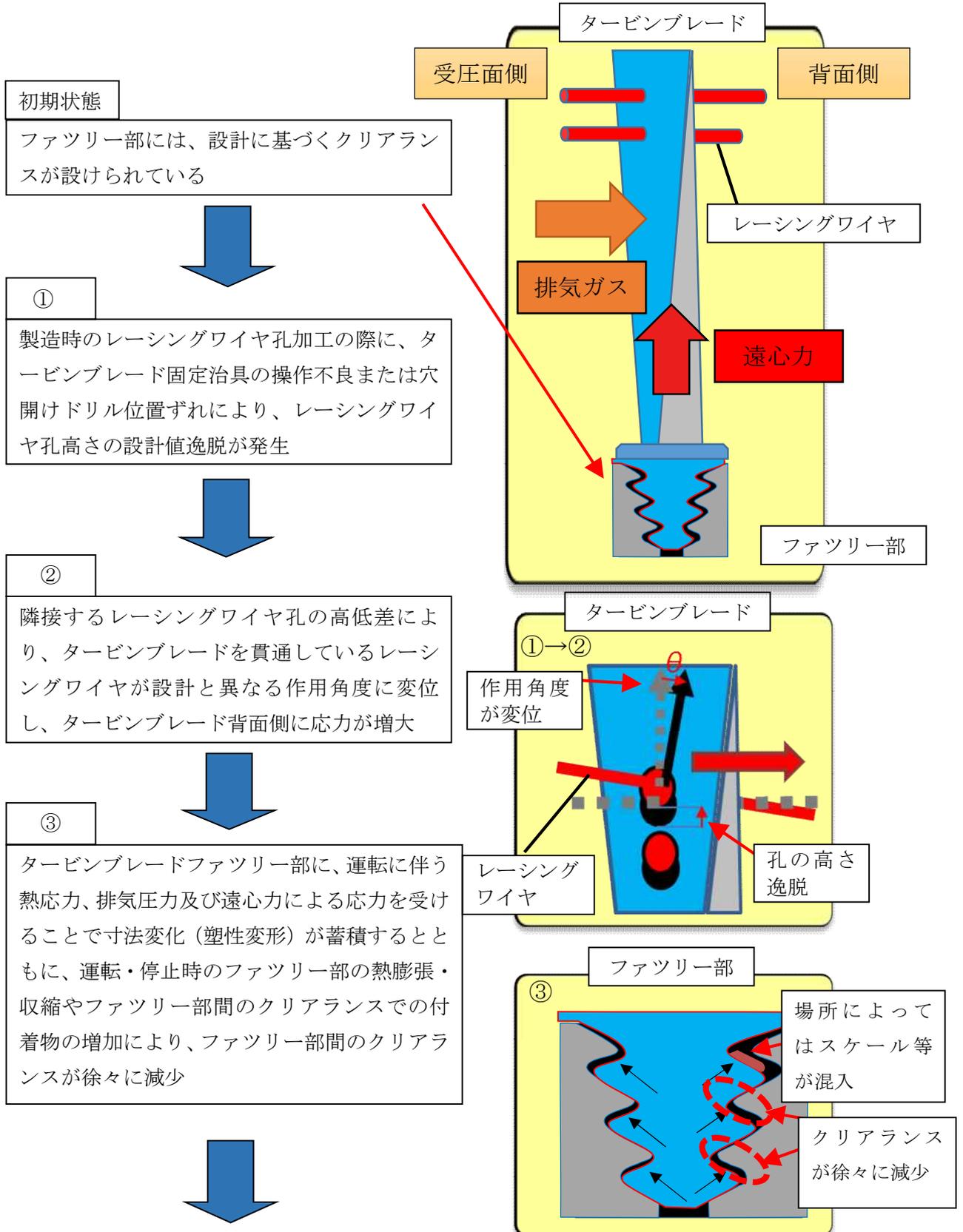
- ・原子力安全推進協会の国内外トラブル情報(NUCIA)から非常用ディーゼル発電機過給機のタービンブレード折損に関する情報を検索。
- ・原子力安全推進協会の海外故障・トラブル要約情報(INPO、WANO、NRC等の情報を要約したもの)から非常用ディーゼル発電機過給機のタービンブレード折損に関する情報を検索。
- ・その他国内原子力事業者のプレス情報等から非常用ディーゼル発電機過給機のタービンブレード折損に関する情報を検索。

表－1 調査結果

プラント	異常発生日 (発見日)	損傷状況	原因	水平展開要否
北海道電力 泊3号機	2009/8/19	<ul style="list-style-type: none"> <li>・タービンブレードの翼部破損 (強制破断の様相が見られた)</li> <li>・ノズル押え板固定ボルト緩み 等</li> </ul>	製造組立て時の施工不良	済み (点検組立て時のトルク管理)
関西電力 美浜1号機	2013/2/5	<ul style="list-style-type: none"> <li>・タービンブレードの翼部破損 (強制破断の様相が見られた)</li> <li>・プロアインペラ固定ボルトの緩み 等</li> </ul>	点検組立て時の施工不良	不要 (構造が異なるため)
JAEA 東海再処理施設	2018/8/4	<ul style="list-style-type: none"> <li>・タービンブレード外周部の摩耗</li> <li>・軸受損傷</li> <li>・油溜まり部に多量の金属粉が発生 等</li> </ul>	オイルシール部の摺動摩耗	不要 (構造が異なるため)

タービンプレード疲労破壊の推定メカニズム

(以下の図は事象進展のイメージ図)

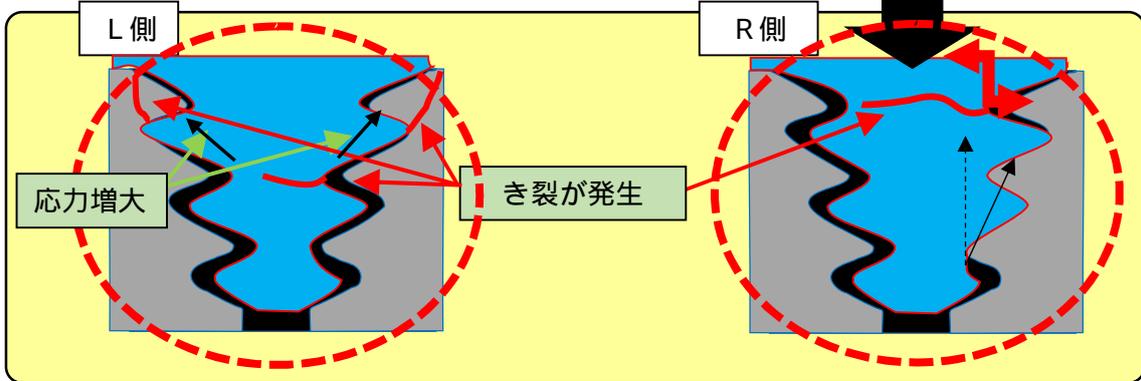
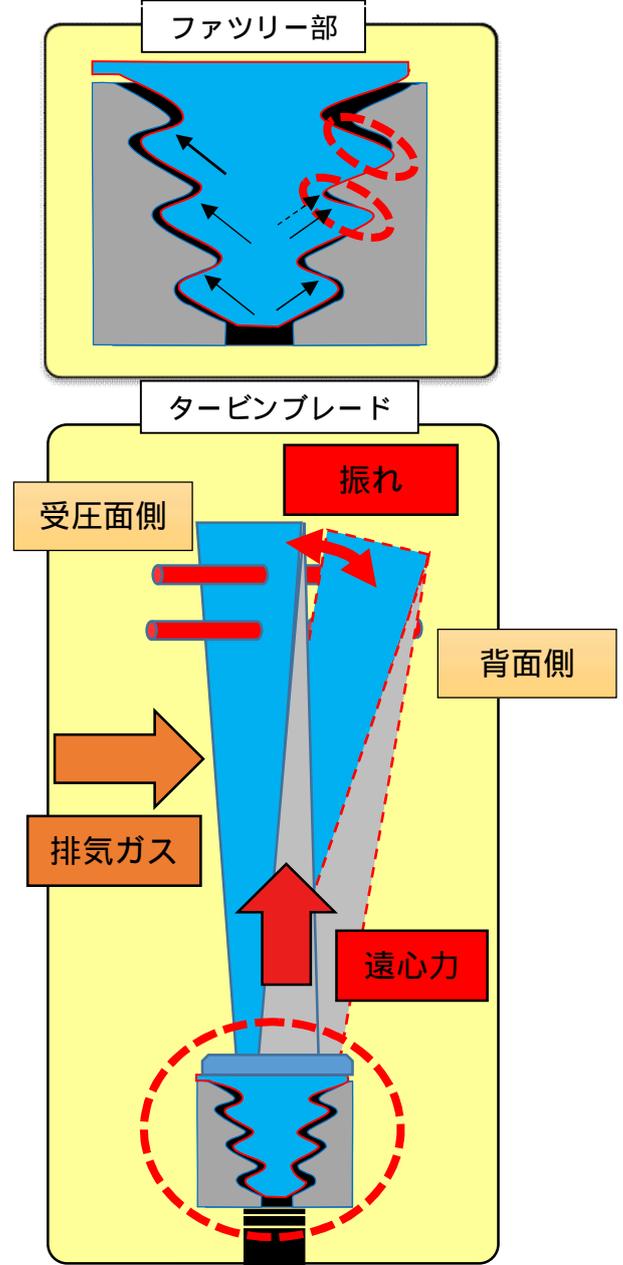


(以下の図は事象進展のイメージ図)

タービンブレード取外し後の手入れに伴う  
ファツリー部の付着物除去により、タービン  
ブレード再取付け後のファツリー部間の当  
たり状態やクリアランスが部分的に変化

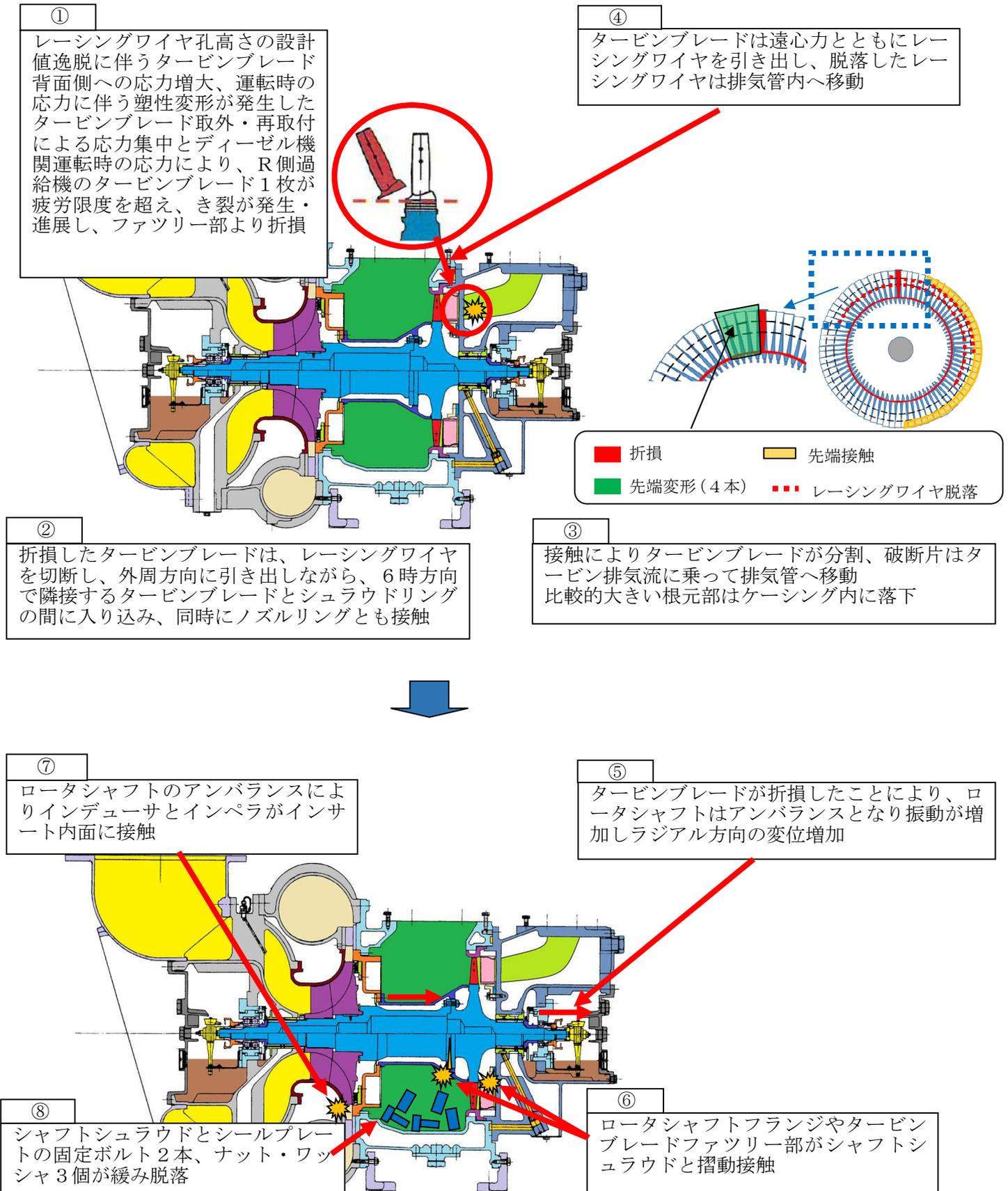
タービンブレード背面側への応力増大とファ  
ツリー部間の当たり状態やクリアランスの  
変化に伴う応力集中に、運転・停止時の熱膨張・  
収縮が加わることで、ある時点を境に、デー  
ゼル機関からの排気脈動を加えた運転時の応  
力が疲労限度を超え、ファツリー部くびれ部  
にき裂が発生

増大した運転時の応力を受け続けることで、き  
裂が進展し、最終的にタービンブレードがファ  
ツリー部より延性破壊し、折損  
L側ロータファツリー部は、L側タービンブ  
レードファツリー部で発生したき裂により、ター  
ビンブレード側から受ける応力が局所的に増大  
し、結果としてロータ側にき裂が発生したも  
の と推定



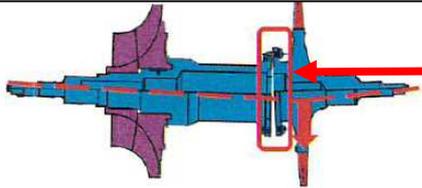
タービンブレードファツリー部のき裂発生箇所は、R側が第一くびれ部、L側が第二く  
びれ部となっており、それぞれ異なるが、ファツリー部間の当たり状態の相違により  
応力集中箇所が異なったことによるものと推定

R側過給機軸固着の推定メカニズム



⑨

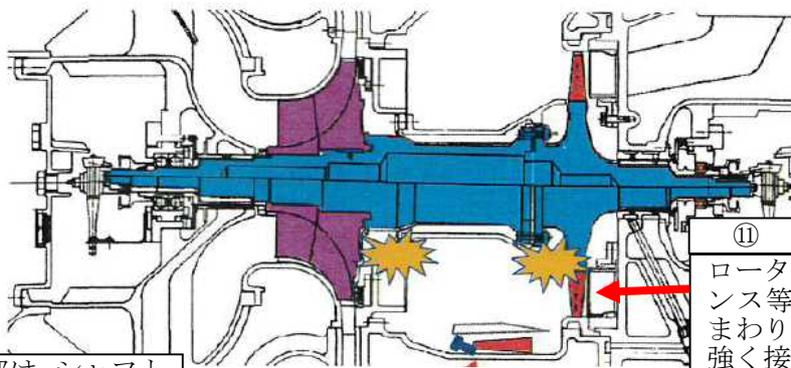
ロータシャフトフランジがシャフトシュラウドと摺動接触し、ロータシャフトフランジ結合部に隙間が発生



ロータシャフト結合ボルトに曲り、伸びが発生  
ロータシャフトの結合部が口開き



ロータのアンバランスに対し剛性の低いシャフト結合箇所の場合に最大0.5mmの隙間が生じた。(ボルトに緩みはなかった。)



⑩

ロータシャフト屈曲、アンバランス等の要因により軸が振れまわり、回転体とケーシングが強く接触

⑩

シャフトシュラウド下部は、シャフトシュラウド自身の振動またはロータシャフトとの接触により破損し、ケーシング内に破損部が脱落

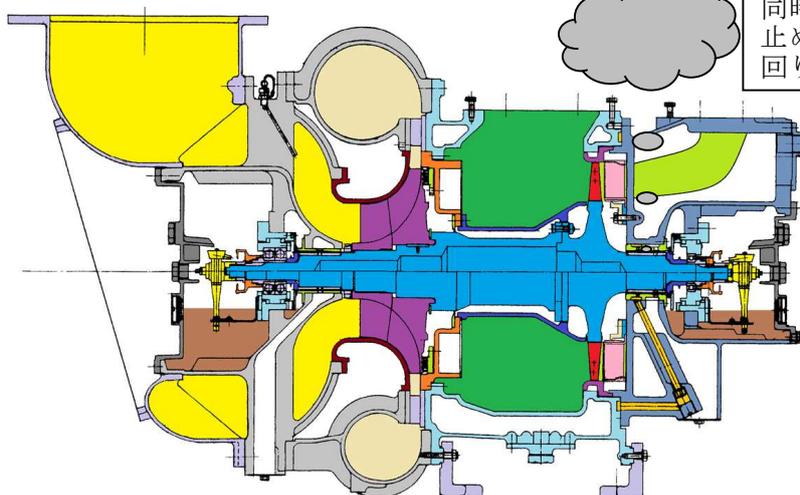
タービン側ころ軸受のころ転動面外観では、内輪軌道面の約1/3周のところが摩耗、変形。瞬間的に大きな荷重(衝撃荷重)を受けたものと推定



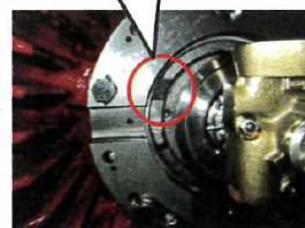
⑫

キックバック現象によりロータシャフトが3時方向に急負荷し、ベアリングのころと保持器を潰し、完全軸固着  
同時にタービン側弾性装置(軸受押さえ回り止め部)が逆回転方向に回転し、軸受押さえ回り止め部の爪を折損させ270°回転

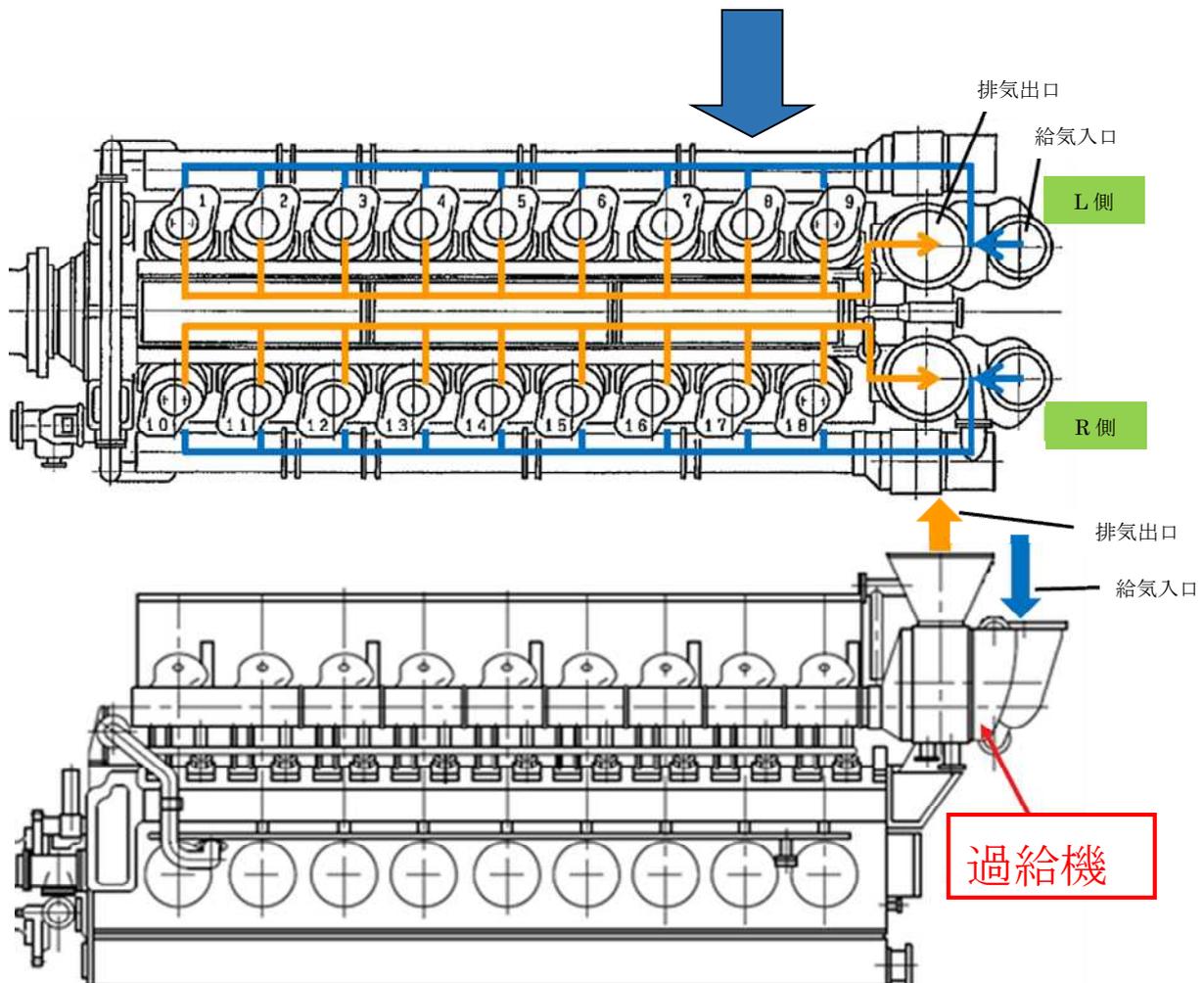
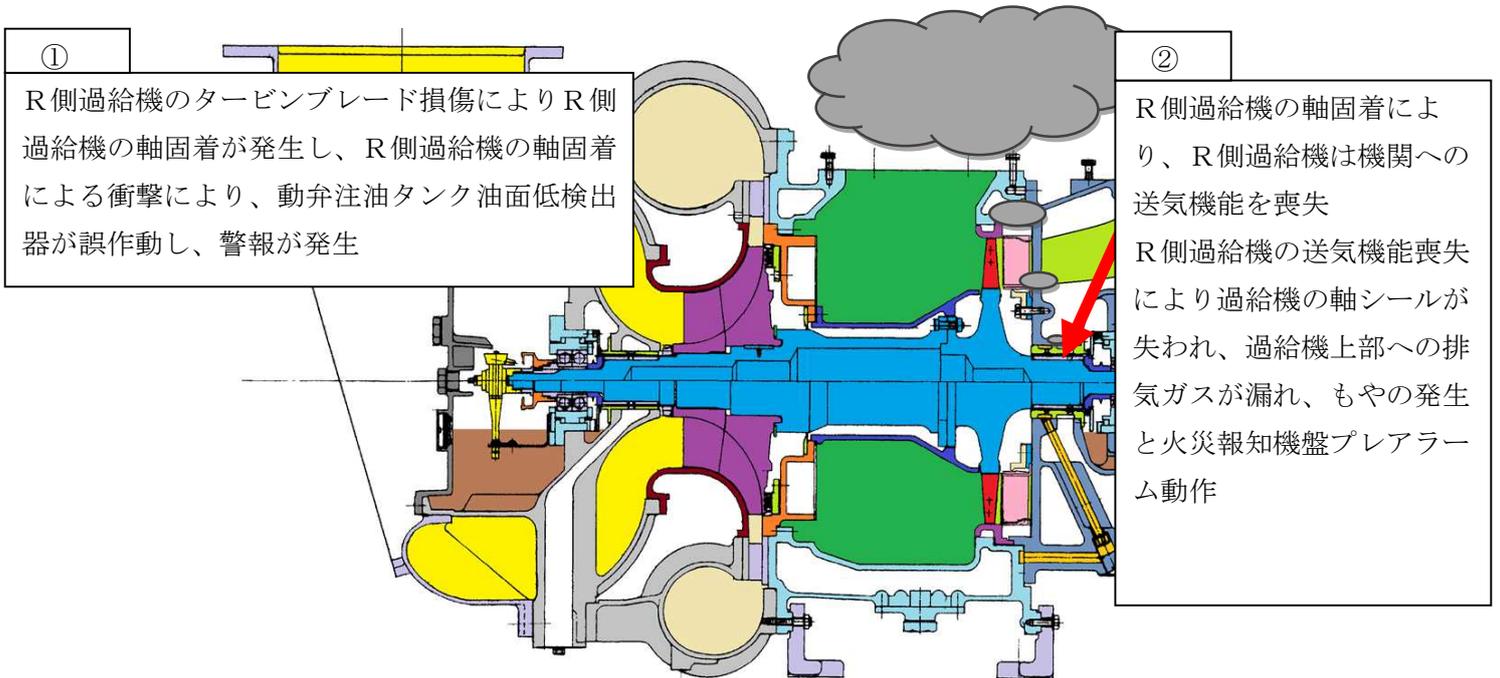
灰色のもやが過給機周囲から確認された。



欠損部

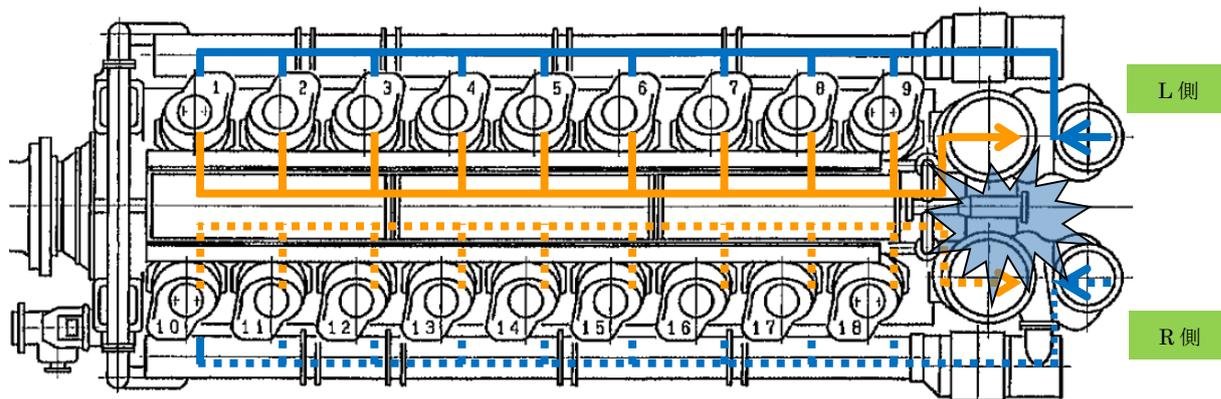


発電機出力低下に関する推定メカニズム



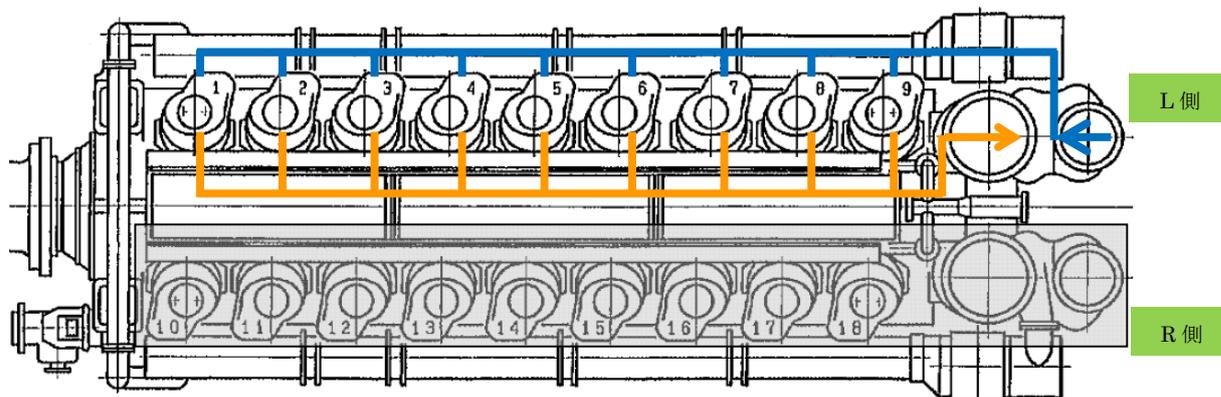
③

過給機のR側とL側は、給気と排気ラインが各々分離しており、L側への送気及び機関の運転は継続  
一方、R側は燃焼室への送気がほぼ遮断され、R側シリンダは不完全燃焼から未燃焼状態となった  
R側シリンダ内のピストン上下動作は圧縮損失となりL側シリンダへの動作抵抗が増加し、機関回転  
速度を低下させるように働く



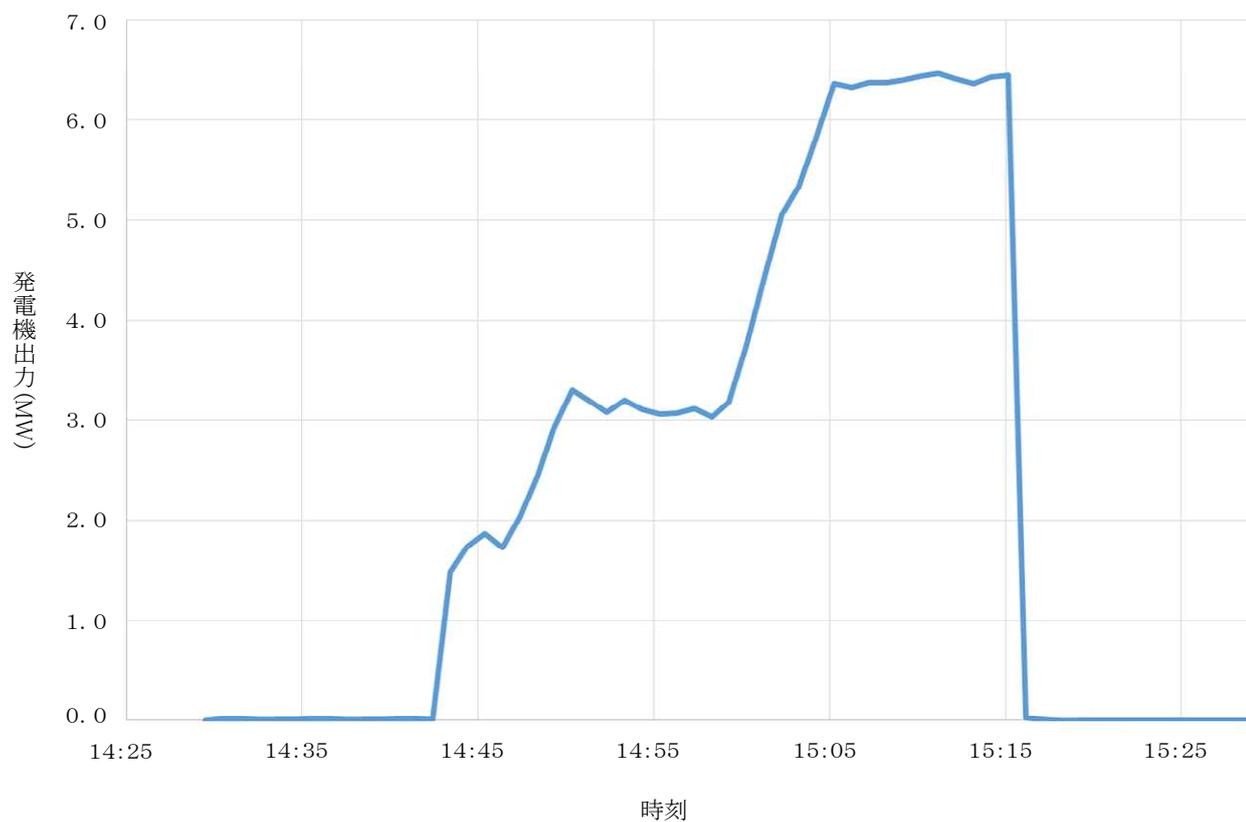
④

系統連携した機関の回転速度は変化せず、手動ガバナ操作であったため、ガバナは機関への燃料供給  
量を変化することなく機関出力は急激に低下



⑤

機関出力が低下傾向状態では、R側シリンダの抵抗を上回る機関出力をL側シリンダで発生させることができず、発電機出力が0MW近傍まで急激に低下 (別紙-1参照)



定格出力運転中における過給機軸固着発生の影響による出力変化の推定

当該D/G製造工場において実施した、両列過給機運転（以下、「両列運転」という。）と片列無過給運転（以下、「片列運転」という。）での出力と燃料ラック目盛の運転データをもとに、定格出力運転状態時に片列過給機軸固着が発生した際の出力変化について、以下のとおり考察を実施した。

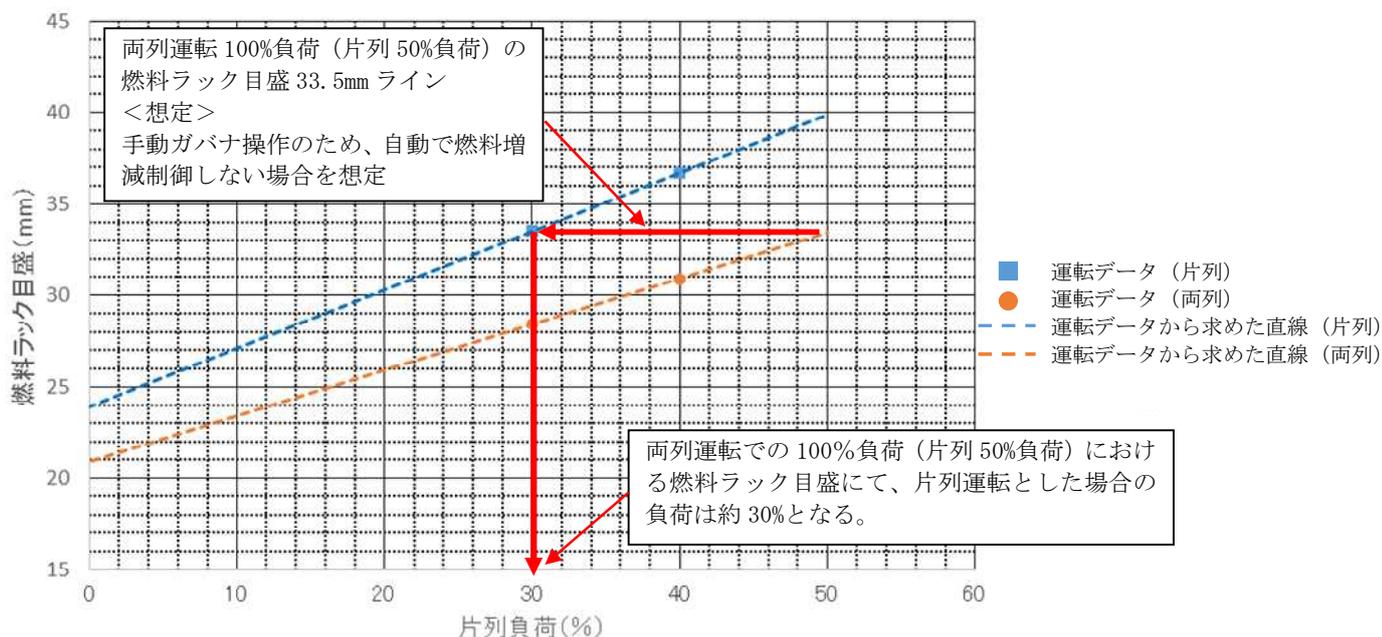
○考察に用いた当該D/G製造工場における運転データ

- ・両列運転：定格出力運転状態における 60%/80%負荷での燃料ラック目盛データのうち、片列運転時に使用した過給機側の燃料ラック目盛データ  
 なお、両列運転 100%負荷（片列運転 50%負荷）のため、両列運転 60%/80%負荷は片列運転での出力 30%/40%負荷に相当
- ・片列運転：片列運転での出力 30%/40%負荷における、燃料ラック目盛データ  
 なお、無過給状態とした片列側は燃料供給しないよう設定（燃料ラック目盛は0mm）

○考察

図－1に示すとおり、両列運転での 100%負荷状態において、手動ガバナ操作のため自動で燃料増減制御しない場合では、燃料ラック目盛が変化しないことから、両列運転から片列となることで、D/G出力は約 30%まで低下することが確認できる。

また、本事象の様に、R側過給機が軸固着した場合は、軸固着によりタービンブレードが排気ラインの抵抗を増大させ、シリンダ内の排気が十分に行われず、R側過給機のシリンダ動作を阻害することから、正常な片列運転よりもD/G出力は低下するものと推定する。



図－1 過給機軸固着発生の影響による出力変化について